

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**“EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS DE LONGITUD DE BARRAS
DE MORTERO FABRICADAS CON CEMENTOS PORTLAND
TIPO V Y TIPO V MODIFICADO CON ESCORIAS
SIDERÚRGICAS FRENTE A LA AGRESIÓN QUÍMICA DE LOS
SULFATOS”**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR
PRETEL CÁCEDA ROSARIO VIRGINIA**

**ASESOR
ING° LEONARDO RUFINO CARLOS PEREYRA**

CALLAO – 2022

PERÚ

PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue expuesta por la Bachiller **PRETEL CÁCEDA ROSARIO VIRGINIA** ante el Jurado de Sustentación de Tesis conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

ING° LUÍS AMÉRICO CARRASCO VENEGAS	PRESIDENTE
ING° JULIO CÉSAR CALDERÓN CRUZ	SECRETARIO
Lic. ANA MARÍA REYNA SEGURA	VOCAL
Lic. VICTORIA YSABEL ROJAS ROJAS	MMIEMBRO SUPLENTE
ING° LEONARDO RUFINO CARLOS PEREYRA	ASESOR

Tal como está asentado en el Libro de actas N° 01 Folio N° 78 y Acta N° 77 de fecha veintiuno de agosto de 2021, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 245-2018-CU del 30 de octubre de 2018

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo incondicional y brindarme la confianza necesaria para alcanzar mis metas.

A mí querida tía Mila, quien siempre estuvo impulsándome en mi educación.

A Alexander, por su paciencia y acompañamiento en este proyecto.

AGRADECIMIENTO

A los profesores de mi facultad, que siempre están en la búsqueda de conocimiento, impartiéndonlo y propiciándonos el interés en la carrera; y así, poder trascender en mi proceso formativo, logrando la culminación de esta hermosa profesión.

A los profesionales de las empresas cementeras por su orientación y aporte científico, sin los cuales no hubiese podido completar la presente investigación.

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	9
1.2 Formulación del problema.....	10
1.2.1 Problema general	10
1.2.2 Problemas específicos	10
1.3 Objetivos de la investigación.....	10
1.3.1 Objetivo general	10
1.3.2 Objetivos específicos	11
1.4 Limitantes de la investigación	11
II. MARCO TEÓRICO	12
2.1 Antecedentes de la investigación	12
2.1.1 Internacionales	12
2.1.2 Nacionales	15
2.2 Bases teóricas	17
2.2.1 El Cemento	17
2.2.2 Proceso de fabricación del cemento	18
2.2.3 Tipos de cemento	21
2.2.4 Características físicas y mecánicas de los cementos	23
2.2.5 Propiedades químicas	25
2.2.6 Cemento Tipo V	31
2.2.7 Cementos Tipo V con escorias siderúrgicas	33
2.3 Conceptual	39
2.4 Definición de términos básicos	40
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	42
3.1 Hipótesis	42
3.1.1 Hipótesis general.....	42
3.1.2 Hipótesis específicas.....	42
3.2 Definición conceptual de variables	42
3.2.1 Operacionalización de las variables	42

IV. DISEÑO METODOLÓGICO	44
4.1 Tipo y diseño de investigación	44
4.2 Método de investigación	44
4.3 Población y muestra	45
4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado	45
4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	46
4.6 Análisis y procesamiento de datos	47
V. RESULTADOS.....	50
5.1 Resultados descriptivos	50
5.2 Resultados inferenciales	53
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	58
6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis	58
6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares	59
6.3 Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes....	60
VII. CONCLUSIONES.....	62
VIII. RECOMENDACIONES	63
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXOS	67

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1	Nomenclatura de los componentes principales del clinker	26
TABLA 2	Calor de hidratación del cemento Portland	28
TABLA 3	Análisis químico de la escoria siderúrgica o de alto horno	35
TABLA 4	Operacionalización de las variables	43
TABLA 5	Cambios de longitud de las barras de cemento Tipo V	51
TABLA 6	Cambios de longitud de las barras de cemento Tipo V Modificado	53
TABLA 7	Comparativo de valores promedio de cambios de longitud	54
TABLA 8	Comparativo de diferencias promedio según tipo de cemento	56

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	Fractura en probetas de morteros por la expansión	30
FIGURA 2	Proceso de obtención de la escoria siderúrgica o alto horno	34
FIGURA 3	Método de investigación por etapas	46
FIGURA 4	Mediciones de las barras de mortero con reloj comparador de longitudes	49
FIGURA 5	Cambios de longitud de las barras de cemento Portland Tipo V	52
FIGURA 6	Cambios de longitud de las barras- cemento Tipo V Modificado con escorias siderúrgicas	54
FIGURA 7	Valores promedios de cambios de longitud según los tipos de cemento	55
FIGURA 8	Diferencias promedio de cambios de longitud según los tipos de cemento	56
FIGURA 9	Cambios de longitud de cemento Tipo V y Tipo V modificado respecto a Norma Técnica Peruana NTP	57

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el propósito de evaluar los cambios de longitud de barras de mortero fabricadas con cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas frente a la agresión química de los sulfatos. Se comparó las longitudes de las barras de mortero; para ello, se tomaron muestras de los dos tipos de cementos en estudio fabricadas por la empresa, con estas muestras de cementos se elaboraron probetas prismáticas para la prueba de expansión de sulfatos descrita en la Norma ASTM 1012 y NTP 334.094–2017 ; los resultados de las variaciones de longitud en un tiempo máximo de 180 días fueron 0,033% para el cemento Portland Tipo V y 0,025% para el cemento Portland Tipo V modificado con escoria siderúrgica, evaluando la expansión de las barras de mortero frente a la agresión química de los sulfatos a los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días.

Con el ensayo seleccionado se demostró cómo el cemento Portland Tipo V presenta mayor expansión lineal o aumento en la longitud de las barras ensayadas, comprobándose un menor desempeño que un cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas, verificándose con este último el incremento en la durabilidad del concreto.

Palabras claves: Escoria siderúrgica, expansión, durabilidad del concreto, barras de mortero.

ABSTRACT

The present work was carried out with the purpose of evaluating the changes in the length of mortar bars manufactured with Portland Type V and Type V cements modified with blast furnace slags against the chemical aggression of sulphates. The lengths of the mortar bars were compared; For this, samples of the two types of cements under study manufactured by the company were taken. With these samples of cements, prismatic specimens were made for the sulfate expansion test described in the ASTM 1012 and NTP 334.094–2017 Standards; the results of the length variations in a maximum time of 180 days were 0,033% for Type V Portland cement and 0,025% for Type V Portland cement modified with steel slag, evaluating the expansion of the mortar bars against chemical aggression of sulfates at 7, 14, 21, 28, 56, 120 and 180 days. With the selected test, it was demonstrated how Type V Portland cement presents greater linear expansion or increase in the length of the bars tested, proving a lower performance than a Type V Portland cement modified with steel slags, verifying with the latter the increase in durability of concrete.

Keywords: Blast furnace slag, expansión, concrete durability, mortar bars.

INTRODUCCIÓN

La industria cementera del Perú en los últimos años ha alcanzado un gran auge y es estratégica en el desarrollo del sector de la construcción. Las tasas anuales de crecimiento de producción y despacho de cemento van en aumento y se espera que éste 2021 sea del 3,5%, indicador que además demuestra el crecimiento económico del país.

En el Perú existen diversas zonas que presentan ambientes agresivos cuyos suelos contienen altas concentraciones de sulfatos y cloruros, agregados áridos reactivos que tienen acción directa sobre las pastas de cemento, produciéndose el fenómeno de erosión, haciendo que éste se expanda y desintegre formándose las fisuras. Estas patologías en el concreto, resultan perjudiciales en la durabilidad de las obras causando la corrosión del acero de refuerzo generando grandes pérdidas económicas. Es por ello que surge la necesidad de producir un cemento de características de alta performance, como es el cemento con escoria siderúrgica que posee propiedades hidráulicas y de dureza; mostrando mejor desempeño y mejores prestaciones en sus propiedades como durabilidad y resistencia mecánicas que los cementos tradicionales.

Es sabido, que la fabricación de Clinker demanda un alto consumo de recurso energético, por lo cual es importante buscar alternativas en su proceso de producción con la finalidad de reducir este consumo que se traduce en pérdidas económicas; el remplazar cierto porcentaje de Clinker por escoria

siderúrgica permite contribuir al incremento de la rentabilidad en las empresas cementeras.

Además, la preocupación actual, es el recalentamiento global y la industria cementera responsable de emisiones de CO₂, tiene como misión aplicar los principios de la economía circular y disminuir esta huella de carbono, por lo que es necesario realizar investigaciones para la fabricación de cementos buscando métodos alternativos para la mitigación de los pasivos ambientales generados. Con este planteamiento se pretende contribuir a la sostenibilidad medioambiental generando menos emisiones de CO₂ al producir menor cantidad de clinker, aprovechando un subproducto como las escorias de acería y reduciendo la explotación de canteras.

Actualmente, las empresas cementeras en el Perú vienen desarrollando nuevas tecnologías para la producción de cementos necesarias para hacer más eficientes las operaciones en la industria de la construcción. Viendo esta necesidad; se procedió a realizar las pruebas experimentales de laboratorio considerando comparar los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas, con el propósito de evaluar la viabilidad de este último; y posteriormente, se procedió a las correspondientes pruebas industriales en las instalaciones de la empresa cementera.

El objetivo del presente estudio será evaluar el cambio de longitud de las barras de morteros fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas frente a la agresión química de los sulfatos de los sulfatos.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

El desarrollo de las sociedades se traduce en la búsqueda de una mejor calidad de vida de la población, y uno de los pilares para alcanzar este bienestar es la construcción de edificaciones: viviendas y obras de gran envergadura; el Perú no es ajeno a este avance, como resultado de las malas prácticas y un ineficiente control de calidad de materiales usados en la construcción se tienen infraestructuras deterioradas causando perjuicios económicos, es por ello que resulta importante revalorizar la industria de la construcción aplicando tecnologías desde la fabricación de los materiales adecuados usados para este fin.

En el Perú, existen zonas que presentan suelos con altas concentraciones de sulfatos, cloruros, agregados áridos que causan diversas patologías en el concreto, generando construcciones de mala calidad y poca durabilidad.

Por ello, fabricar un cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas, resulta necesario para la elaboración de concretos de alta calidad; porque, permite aprovechar las propiedades hidráulicas y de dureza de las escorias, dando lugar a cementos de mejor resistencia mecánica y durabilidad. Además, al ser las escorias siderúrgicas un pasivo ambiental y usarlas como remplazo de Clinker en la fabricación del cemento reducen las emisiones de CO₂ al medio ambiente, contribuyendo al desarrollo de una industria eco amigable en el sector construcción. Previa fabricación de un cemento es necesario la realización de ensayos de laboratorio como el que se muestra en

la presente tesis; para comprobar y evaluar los parámetros de calidad regidos en las normas de cementos.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuáles son las diferencias en los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con los cementos Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas expuestas a una solución de sulfatos?

1.2.2 Problemas específicos

- 1) ¿Cuáles son los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V a los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días?
- 2) ¿Cuáles son los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas a los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días?
- 3) ¿Cuál es el análisis comparativo de los resultados de los cambios de longitud de las barras de morteros fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas??

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el cambio de longitud de las barras de morteros fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas frente a la agresión química de los sulfatos.

1.3.2 Objetivos específicos

- 1)** Determinar los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V a los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días.
- 2)** Determinar los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas a los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días.
- 3)** Realizar un análisis comparativo de los resultados de los cambios de longitud de las barras de morteros fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas, según los tipos de cemento.

1.4 Limitantes de la investigación

Teórico: Existe poca información relacionada a la investigación y falta de trabajos experimentales previos.

Temporal: No existe limitante temporal. El periodo de tiempo para la recolección de datos es de seis meses a partir de la inmersión de las barras de morteros fabricadas para este estudio.

Espacial: No representa una limitante, la investigación se realizó en el laboratorio de Calidad de una empresa cementera peruana.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Internacionales

Chen et al. (2017). **“Deterioration mechanism of plain and blended cement mortars partially exposed to sulfate attack”**, este trabajo consistió en investigar el nivel de daños que se producen en los materiales de construcción hechos a base de cemento parcialmente expuesto al ataque por sulfatos, es decir cómo se vio afectada la resistencia mecánica de un espécimen de mortero de cemento en la parte superior no expuesta a una solución de sulfatos y la parte sumergida (expuesta) de ambos morteros de cemento uno simple, y otro mortero de cemento modificado con cenizas volantes y escoria de alto horno. Se ensayaron morteros parcialmente sumergidos en una solución de Na_2SO_4 al 10% soluble en agua monitoreando para mostrar el progreso del daño. Para investigar el cambio de la microestructura, se midieron el cambio de masa, módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y contenido de SO_4 . Los resultados de la investigación indicaron que el deterioro de los morteros de cemento parcialmente sumergidos en sulfato es causado por el ataque químico y físico del sulfato. La parte superior de los especímenes sufren ataque físico y químico del sulfato, mientras que la parte inferior sólo sufren ataque químico. La degradación de los materiales a base de cemento parcialmente expuestos a la solución de sulfato resulta ser más grave que en inmersión total. Concluyendo que las cenizas volantes tienen un mejor efecto que las escorias de altos

hornos sobre la mejora de la resistencia de los morteros de cemento a la inmersión parcial en solución de sulfato.

Al-Swaidani y Dib Aliyan (2015). En su investigación **Effect of Adding Scoria as Cement Replacement on Durability-related Properties**, estudiaron muestras de mortero y de concreto para determinar el efecto de la adición de escoria como reemplazo del cemento sobre la Propiedades de durabilidad, se utilizaron siete tipos de cemento: un cemento Portland simple (control) y seis cementos combinados. Se realizó una prueba rápida de penetración de cloruro de acuerdo con ASTM C 1202 después de dos tiempos de curado de 28 y 90 días. El efecto sobre la resistencia del concreto frente al daño causado por la corrosión de barras de acero se investigó mediante una prueba de corrosión acelerada sometiéndolos a una diferencia de potencial anódico constante. La variación de corriente con el tiempo y el tiempo de falla de las muestras de RC se determinaron a los 28 y 90 días de curado. Además, se investigaron los efectos en medios ácidos agresivos en morteros durante 100 días de exposición a 5% H_2SO_4 , 10% HCl, 5% HNO_3 y soluciones de CH_3COOH al 10%. La evaluación de la resistencia a los sulfatos de barras de morteros se realizó sumergiéndolos en solución de Na_2SO_4 al 5% durante 52 semanas. Los resultados de las pruebas revelaron que los concretos que contienen cementos modificados a base de escoria, tuvieron períodos de iniciación de la corrosión mucho más largos que los de la mezcla de control.

López (2015). **“Estudio sobre la durabilidad de los nuevos tipos de cemento para la evaluación del comportamiento de morteros y hormigones frente a la agresión química de los sulfatos y del agua de**

mar”, analizó la influencia de las características de los nuevos cementos en el comportamiento expansivo originado durante cinco años por el ataque externo de sulfatos y agua de mar, aplicaron diversos métodos de ensayo como el de cambios de longitud para evaluar la expansión y las resistencias químicas frente al ataque de los sulfatos determinando las características químicas y mecánicas de quince cementos y su durabilidad frente al ataque por sulfatos. Se determinó también la resistencia a la compresión y al deterioro superficial de las probetas de mortero, tomándose en consideración las variaciones del contenido en C_3A , los tipos y proporciones de los constituyentes (adiciones puzolánicas, escorias de horno alto, caliza, etc.) Validaron los límites de aceptación establecidos en cada uno de los ensayos para determinar la resistencia a sulfatos y valoraron su desempeño frente a los tipos convencionales de cementos europeos y su comparación en análisis mediante difracción de rayos X para la verificación de las características exigidas en las normas para estos tipos de cementos Al desarrollar el método de ensayo para cementos resistentes y no resistentes a la agresión química de los sulfatos por cambio de longitud, se obtuvieron valores de expansión a seis meses inferiores a 0,05% para los cementos Tipo IP(MS) y IS(MS)

Gruyaert et al. (2011). **“Investigation of the influence of blast-furnace slag on the resistance of concrete against organic acid or sulphate attack by means of accelerated degradation tests”** en esta investigación, de la influencia de la escoria de alto horno (BFS) en la resistencia al ácido o al sulfato del concreto que se realizó mediante pruebas de degradación acelerada. Se registró una reducción significativa del deterioro ácido para el

concreto con escoria de alto horno, que se atribuye principalmente a la diferente composición química del aglutinante. Los indicadores de durabilidad y la porosidad abierta no pudieron explicar las diferentes prestaciones del concreto de cemento Portland simple y del cemento con escoria. Por el contrario, la resistencia del hormigón cíclicamente y parcialmente sumergido en soluciones de sulfato disminuyeron cuando se reemplazan grandes cantidades de cemento por escoria. Los resultados están relacionados con parámetros microestructurales y fisicoquímicos, concluyendo que al reemplazar el cemento Portland ordinario por escoria de alto horno se alteró el comportamiento de durabilidad de hormigón.

Rodríguez et al. (2008) dieron a conocer los resultados de la evaluación del comportamiento de mezclas de hormigón producidas a partir de la activación con waterglass ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$) de una escoria siderúrgica granulada de alto horno colombiana. Las propiedades mecánicas y de durabilidad de los hormigones activados alcalinamente (AAS) se compararon con las correspondientes mezclas de hormigón de cemento Portland producidas con igual proporción de ligante. Estas proporciones variaron entre 340 y 512 Kg por m^3 de hormigón. Los resultados obtenidos indicaron los incrementos en la proporción de la escoria que contribuían a la mejora de las propiedades evaluadas.

2.1.2 Nacionales

Guevara y Tantarico (2019) en su tesis **“Evaluación comparativa de las características físico-mecánicas de las diferentes marcas de**

cementos portland Tipo I comercializadas en el norte y centro del Perú, 2018”, aplicaron el método de ensayo para determinar la expansión de barras de mortero de cemento portland curado en agua, durante 14 días; haciendo una comparación entre cementos Tipo I, cuyos valores de expansión presentados oscilan entre 0,011% y 0,116%. concluyendo que los parámetros físicos y mecánicos de los seis cementos evaluados cuyos resultados de cada ensayo realizado, se encuentran en los límites admisibles estipulados en NTP 334.009

Melgarejo (2019). **“Influencia de la Escoria al Producir Concreto Permeable en Pavimentos Urbanos de la Ciudad de Pasco – Distrito de Yanacancha”**, realizó el diseño de mezcla óptimo para un concreto de alta resistencia mecánica y permeabilidad usando escoria producida por la minera Doe Run Perú como residuo de los hornos de su proceso de producción. Los ensayos realizados determinaron un incremento de la resistencia a la compresión de 261,8 Kg/cm² con una relación agua cemento de 0,3 y cuya permeabilidad fue de 0,668 cm/s; obteniéndose estos resultados óptimos al usar la escoria en un porcentaje de 5% como uno de los agregados para la construcción de pavimentos urbanos de la ciudad de Cerro de Pasco.

Cortez y Sánchez (2006) a través de su tesis **“Mejoramiento en las propiedades físicas y químicas del cemento portland Tipo MS por adición de Clinker Tipo V en la sustitución de escoria BFS de alto horno”** realizaron un estudio cuyo objetivo era conocer el comportamiento de los cementos Portland Tipo MS producidos con Clinker Tipo V y los producidos con

escoria de alto horno, para la reducción del uso de la escoria que venía siendo usada en la producción de cemento Portland Tipo MS por la empresa Cementos Pacasmayo, quienes la adquirirían de la empresa Sider Perú que estaba próxima a la finalización de sus operaciones lo que hacía necesario sustituir la escoria, para ello diseñan un cemento Tipo V. Realizaron pruebas físicas y químicas como residuo insoluble, pérdida al fuego, óxido férrico, óxido de calcio y resistencia a la compresión obteniendo como resultados características similares al cemento fabricado con escoria siderúrgica, cumpliendo las normas ASTM y de la calidad óptima como un cemento con escoria.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 El Cemento

El cemento es un material inorgánico, no metálico, compuesto de cal, alúmina, fierro y sílice (calizas y arcillas), finamente molidas; es un aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, que mezclado con agua forma una masa compacta que fragua y se endurece debido a sus propiedades físicas y mecánicas de resistencia y estabilidad incluso en contacto con el agua.

El cemento resulta de la pulverización del Clinker frío, a un grado de finura determinado, al cual se le agrega sulfato de calcio natural. A criterio del productor pueden incorporarse adiciones, para impartir determinadas propiedades al cemento, en proporción tal, que no sean nocivos para el comportamiento posterior del producto.

El cemento ha jugado un papel clave en la historia de la civilización, su uso puede constatarse desde la antigüedad. El denominado cemento Portland fue patentado en 1824, y desde finales del siglo XIX, la unión del cemento Portland con arena y grava para formar hormigón o también llamado concreto, viene siendo esencial para la construcción de viviendas, hospitales, escuelas, carreteras, puentes, puertos, etc. y elaboración de morteros para pegar superficies de distintos materiales o para revestimientos de superficies a fin de protegerlas de la acción de sustancias químicas.

En la actualidad, el cemento se ha convertido en uno de los materiales de construcción más utilizados, no existen obras que se puedan emprender sin su uso, es el elemento activo en una mezcla concreto o de mortero por ser el pegante más barato y versátil por excelencia, contribuyendo al bienestar de la sociedad y al crecimiento económico por generaciones.

2.2.2 Proceso de fabricación del cemento

- a) Explotación y extracción.-** Es la primera etapa de la fabricación del cemento iniciándose con la explotación de canteras. La piedra caliza es la materia prima más importante en la producción del cemento y la que en más cantidad porcentual se utiliza para la producción inicial de un mineral hidráulico artificial llamado Clinker que es la base para la producción de todo tipo de cemento. Este material resultante de la voladura es transportado en camiones para su posterior trituración.
- b) Trituración de la materia prima.-** Los minerales utilizados para la fabricación del Clinker pasan por un proceso de “trituración”, este se realiza en 2 o más etapas las cuales trituran la materia prima a un tamaño más

pequeño para un mejor y más fácil uso. La trituración de la roca, se realiza en dos etapas:

1) Primero se procesa en una chancadora primaria, del tipo cono que puede reducirse a un tamaño máximo de 1,5 cm hasta los 2,5 cm. El material se deposita en un patio de almacenamiento. En seguida, se verifica su composición química, pasa a la trituración secundaria, reduciendo su tamaño a 2 mm aproximadamente. El material triturado es decir la piedra caliza y los otros minerales como hierro y arcillas se depositan en el parque de materias primas y luego son acarreadas por una cinta transportadora para continuar el proceso de fabricación del cemento.

c) **Molienda de crudo.**- Es realizada por molinos de bolas, prensas de rodillos o molinos verticales, que producen un material de alta finura. En este proceso se efectúa la adecuada dosificación de los materiales, de acuerdo al diseño de mezcla previsto, para optimizar la composición de la harina de crudo que ingresará al horno, considerando la calidad del clinker con las mejores características que se requiera. El material molido debe ser homogeneizado para garantizar la efectividad del proceso de clinkerización manteniendo su calidad constante. Este proceso se efectúa en silos de homogeneización. El material resultante constituido por un polvo de alta finura debe presentar una composición química constante para su posterior calcinación en el horno.

d) **Pre calcinación.**- La “harina cruda” es introducida mediante un sistema de transporte neumático y debidamente dosificada a un intercambiador de

calor por suspensión de gases de varias etapas, en la base del cual, se instala un sistema de pre calcinación de la mezcla antes de la entrada al horno rotatorio donde se desarrollan las restantes reacciones físicas y químicas que dan lugar a la formación del clinker. El intercambio de calor se produce mediante transferencias térmicas por convección a temperaturas de 950°C a 1 100°C en un sistema de cuatro a seis ciclones en cascada, que se encuentran al interior de una torre de concreto armado de varios pisos, con alturas superiores a los cien metros, en donde la “harina cruda” compuesta esencialmente de carbonato cálcico (CaCO_3), desciende por cada etapa para ser deshidratada y descarbonatada generando óxido de calcio o cal (CaO) y liberando dióxido de carbono (CO_2) en el proceso.

- e) Clinkerización.-** El horno rotatorio es el elemento fundamental para la fabricación del cemento. Está constituido por un tubo cilíndrico de acero con longitudes de 40 a 100 m y con diámetros de 3 a 6 m, que es revestido interiormente con materiales refractarios.

En el horno se alcanzan temperaturas de 1 400°C a 1 600°C para la producción del clinker. Las reacciones de clinkerización se encuentran alrededor de 1 450°C, reaccionando el óxido de calcio CaO con sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxidos de hierro (Fe_2O_3), estas reacciones químicas dan lugar a la formación de minerales hidráulicos como silicatos, aluminatos y ferritas de calcio, principales constituyentes de las fases del clinker.

El clinker que egresa del horno de una temperatura de 1200 °C pasa luego a un proceso de enfriamiento rápido con aire por enfriadores de parrilla, dando lugar a la formación de pellets de clinker. Luego, por transportadores metálicos es llevado a una cancha de almacenamiento o silos de clinker.

- f) Molienda de cemento.**- El clinker es mezclado con yeso y adiciones (previamente dosificados) en los molinos de bolas a circuito cerrado o prensas de rodillos, donde son molidos hasta obtener una finura de alta superficie específica, las adiciones aportan propiedades que mejoran sus cualidades y disminuyen las emisiones de CO₂ al ambiente; el polvo resultante de color gris es el cemento.
- g) Almacenamiento y distribución a granel.**- En este paso el cemento está listo para ser utilizado, durante todo el proceso han pasado rigurosos controles de calidad y es enviado por medios neumáticos a los silos de almacenamiento y es envasado en bolsas de 42,5 Kg o a granel para su posterior distribución.

2.2.3 Tipos de cemento

En la mayoría de los países en que se fabrica el cemento Portland, existen varios tipos y con diferentes características. Las variables más importantes son la velocidad de endurecimiento, la velocidad de desprendimiento de calor durante la hidratación y la resistencia del cemento endurecido al ataque por soluciones de sulfatos. Estas características están influenciadas por las cuatro fases mineralógicas: silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) y solución sólida de C₄AF y por

factores físicos como la finura alcanzada por la molienda (Ochoa, 1995)

Por el tipo de clinker según NTP 334.009 (ASTM C 150) los cementos Portland se clasifican en:

- a) **Tipo I** : De uso general
- b) **Tipo II** : De uso general, específicamente cuando se desea moderada resistencia a los sulfatos
- c) **Tipo II MH** : De uso general, específicamente moderado calor de hidratación
- d) **Tipo III** : Para cuando se requiera alta resistencia inicial
- e) **Tipo IV** : Para cuando se desea bajo calor de hidratación
- f) **Tipo V** : Para cuando se desea alta resistencia a los sulfatos.

Por el tipo de adición según NTP 334.090 (ASTM C 595) se clasifican en:

a) Puzolánicos:

- 1) **Cemento Portland Puzolánico IP:** Producido mediante la molienda conjunta de Clinker y puzolana (contenido de puzolana: 15% – 40%)
- 2) **Cemento Portland Puzolánico modificado I(PM):** producido mediante la molienda conjunta de Clinker y puzolana (contenido de puzolana:<15%

b) Con Escorias:

- 1) **Cemento Portland de Escoria Tipo IS:** producido mediante la molienda conjunta de Clinker y escoria (contenido de escoria: 25% – 70%)

2) Cemento Portland de Escoria Modificado I(SM): producido mediante la molienda conjunta de Clinker y escoria (contenido de escoria: <25%)

c) Compuestos:

1) Cemento Portland Compuesto Tipo ICO: Obtenido por pulverización conjunta de clinker Portland, materias calizas y/o inertes hasta un máximo de 30%

Por el tipo de desempeño según la NTP 334.082 (ASTM C 1157) los cementos se clasifican en:

- a) Tipo GU :** De uso general
- b) Tipo HE :** De alta resistencia inicial
- c) Tipo MS :** De moderada resistencia a los sulfatos
- d) Tipo HS :** De alta resistencia a los sulfatos
- e) Tipo MH :** De moderado calor de hidratación
- f) Tipo LH :** De bajo calor de hidratación

2.2.4 Características físicas y mecánicas de los cementos

a) Fraguado.- Arrollo et al. (2019) afirmó que la velocidad de fraguado de un cemento viene limitada por las normas estableciendo un periodo de tiempo a partir del amasado, dentro del cual deben producirse el principio y el fin de fraguado. Ambos conceptos se definen de un modo convencional, mediante el método estándar de la aguja de Vicat, porque el fraguado es un proceso continuo que se inicia al amasar el cemento y se prolonga por el endurecimiento sin solución de continuidad. Las penetraciones de la aguja de Vicat sobre una probeta de pasta normal de cemento, en función del tiempo, dan una idea del proceso de fraguado.

b) Expansión.- La expansión se origina por la aparición de esfuerzos internos de la pasta que al encontrarse en estado endurecido se incrementa la porosidad produciéndose fisuración progresiva y la consiguiente disminución de la resistencia trae como consecuencia la desintegración del concreto.

Los ensayos de estabilidad de volumen tienen por objeto manifestar a corto plazo, el riesgo de expansión tardía que puede tener un cemento fraguado debido a la hidratación del óxido de calcio o del óxido magnésico libres.

El método de ensayo aplicado en Perú es el americano que deriva de las normas ASTM 1210, el cual consiste en determinar los cambios de longitud en probetas prismáticas utilizando un reloj comparador de longitudes.

c) Finura de molido.- Es una característica ligada al valor hidráulico del cemento, porque influye en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante su fraguado y posterior endurecimiento.

Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento se hidratan solos en una profundidad de 0,01 mm, por lo que, si dichos granos son muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte.

Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos (lo que en general resulta perjudicial), el conglomerante resulta ser más susceptible a la meteorización (envejecimiento) tras un almacenamiento prolongado, y disminuye su

resistencia a las aguas agresivas. Aunque las resistencias mecánicas aumentan con la finura, el cemento Portland debe estar finamente molido, pero no en exceso para que alcance las debidas resistencias a las distintas edades, asegurando su calidad.

- d) Resistencias mecánicas.-** Como resistencia de un cemento se entiende la de un mortero normalizado, amasado con arena de características y granulometría determinadas con relación agua/cemento igual a 0,5, en las condiciones que especifica la norma UNE 80101, que es análoga a la norma europea EN 196–1 y ASTM C 109

En Europa las probetas son prismáticas de $4 \times 4 \times 18 \text{ cm}^3$. Se rompen primero a flexotracción con carga centrada y luego, cada uno de los trozos resultantes, se rompe a compresión sobre superficie de $4 \times 4 \text{ cm}^2$. Las roturas se efectúan normalmente a 2, 7 y 28 días

La ASTM contempla probetas cúbicas de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ y se ensayan a edades de 3, 7 y 28 días (Arrollo et al. 2019)

2.2.5 Propiedades químicas

- a) Composición química.-** Las materias primas utilizadas en la fabricación del cemento Portland consisten principalmente de cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Estos compuestos interactúan en el horno rotatorio de producción, para formar una serie de productos más complejos, hasta alcanzar un estado de equilibrio químico, con la excepción de un pequeño residuo de cal no combinada, que no ha tenido suficiente tiempo para reaccionar la cual lleva el nombre de Cal libre. Se entiende, como química

del cemento, la química de los silicatos y aluminatos cálcicos anhidros e hidratados.

En la química del cemento las fórmulas se expresan a menudo con la suma de óxidos; es así, que el silicato tricálcico (Ca_3SiO_5) puede escribirse en la forma 3CaOSiO_2

Esta forma no implica, que los óxidos constituyentes tengan una existencia independiente dentro de la estructura del compuesto. En general, se emplean abreviaturas para las formulas químicas de los óxidos más frecuentes, como C para CaO y S para SiO_2 , el silicato tricálcico Ca_3SiO_5 (3CaOSiO_2) se transforma así en C_3S . Este sistema se usa con frecuencia, justamente con la notación química ordinaria dentro de una simple ecuación química. Por ejemplo:



Como se ha indicado, el clinker Portland es un mineral artificial formado por silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de calcio, por lo cual se suelen considerar cuatro componentes principales del cemento que se pueden observar en la **tabla 1**

Tabla 1

Nomenclatura de los compuestos del clinker

Nombre del compuesto	Fórmula	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaOSiO_2	C_3S
Silicato dicálcico	2CaOSiO_2	C_2S
Aluminio tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaOFe}_2\text{O}_3\text{Al}_2\text{O}_3$	C_4AF

b) Compuestos del cemento Portland.- Estos compuestos se forman en el interior del horno cuando la temperatura alcanza el punto en que la mezcla cruda se transforma en un líquido pastoso, que al enfriarse da origen a sustancias cristalinas de los primeros compuestos mencionados en la **tabla 1 (Ver p. 26)** rodeados por un material intersticial que contiene C_4AF y otros compuestos.

Estos compuestos, no se presentan aislados sino en fases que los contienen en una gran proporción junto con algunas impurezas, por lo cual no son verdaderos compuestos en sentido químico, pero las proporciones calculadas de ellas dan información en cuanto a las propiedades del cemento. De esta forma se habla de la fase Alita a base de C_3S ; de la fase Belita, a base de C_2S , de la fase aluminato, rica en C_3A , y de la fase ferrito, solución sólida que consiste en ferritos y aluminatos de calcio.

- 1) Alita (a base de C_3S).**- Es la fase principal en la mayoría de los clinker Portland y de ella dependen en buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica; el C_3S endurece más rápidamente por tanto tiene mayor influencia en el tiempo del fraguado y en la resistencia inicial.
- 2) Belita (C_2S).**- Es usualmente la segunda fase en importancia en el clinker y su componente principal, el C_2S , se hidrata más lentamente y su contribución al desarrollo de la resistencia empieza a sentirse después de una semana.
- 3) Aluminio tricálcico (C_3A).**- Suministra al cemento un calor de hidratación grande, elevada velocidad de fraguado y alta retracción, por

lo que es el compuesto que gobierna las resistencias a corto plazo, su estabilidad química es buena frente al agua de mar y muy débil frente a los sulfatos.

4) Ferritoaluminato tetracálcico (C₄AF).- No participa en las resistencias mecánicas y su presencia se debe a la necesidad de utilizar fundentes que contienen hierro en la fabricación del Clinker, tiene un pequeño calor de hidratación y gran velocidad de fraguado.

c) Calor de hidratación.- Se genera cuando reacciona el cemento y el agua, siendo un proceso exotérmico lo cual hace que los concretos al fraguar y endurecer aumenten de temperatura; este incremento es importante en concretos masivos, debido a que cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso térmico, se origina contracción del material, que puede conducir a graves agrietamientos.

La cantidad de calor depende de la composición química del cemento; la tasa de generación de calor es afectada por la finura y temperatura de curado, así como la composición química.

Tabla 2

Calor de hidratación del cemento Portland

Compuesto	Calor liberado en Cal/g			Hidratado Totalmente
	7 días	28 días	6 meses	
C ₃ S	110	120	120	120
C ₂ S	20	45	60	62
C ₃ A	185	205	207	207
C ₄ AF	40	50	70	100

Data empresa Caliza Cementos Inca

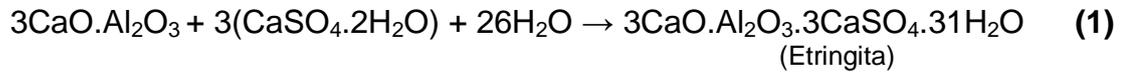
En un cemento Portland normal el calor de hidratación es de 80 -100 calorías por gramo el aluminato tricálcico (C_3A) desarrolla el más alto calor de hidratación por lo cual se debe controlar su contenido en un cemento.

- d) Durabilidad.-** La durabilidad es una propiedad de los materiales, el ACI la define como su capacidad para resistir las agresiones medioambientales, ataques físicos, químicos, la abrasión u otros procesos de deterioro. Es decir, un concreto o un mortero durable conservará su forma, calidad y funcionalidad originales al estar expuestos al medio ambiente durante el ciclo de vida para el cual fue proyectado con un mínimo de mantenimiento. Pero cuando el material pierde sus propiedades originales y su uso representa un peligro por daños estructurales y su remplazo o reparación resulta antieconómico, se habla del fin de su vida útil.

Para Mehta y Montero (2014) una vida útil larga trae consigo tanto beneficios económicos como medioambientales; menor gastos por reparación o remplazo estructural y una reducción en la demanda de insumos.

- e) Resistencia a los sulfatos.-** Diferentes compuestos de sulfato que se encuentran en la naturaleza en forma de sales o disueltos en agua, atacan a los constituyentes del cemento. Los sulfatos atacan el concreto endurecido porque reaccionan con el aluminato tricálcico, para formar el sulfoaluminato de calcio o Etringita como vemos en la reacción 1, el cual tiene un volumen mayor que el de los dos componentes que lo originan, la consecuencia de esa expansión y la aparición de esfuerzos internos de la pasta que al encontrarse en estado endurecido, produce fisuración

progresiva con incremento de porosidad y la consiguiente disminución de la resistencia trae como consecuencia la desintegración del concreto.



La reacción 2 es otra reacción importante en que la presencia de sales de magnesio ocasionan un doble efecto destructivo formando no sólo etringita y yeso, sino también otras especies químicas como la brucita $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ocasionando el remplazo del Ca por Mg en el gel C-S-H como se ve en la reacción 3, generando un compuesto que no tiene propiedades ligantes, causando la destrucción de la estructura siendo ésta la reacción más común en los fenómenos de ataques agresivos en los concretos.

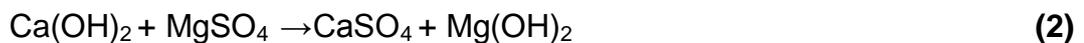


Figura 1

Fractura en probetas de morteros por la expansión



Blanco M.T. (2008).

f) Ataque por exposición al agua de mar.- El agua de mar contiene sales disueltas como el cloruro sódico (NaCl), cloruro de magnesio (MgCl_2), sulfato de magnesio (MgSO_4), sulfato cálcico (CaSO_4), cloruro potásico

(KCl) y sulfato de potasio (K_2SO_4) que son agresivas para el concreto sufriendo deterioro, los iones atacan los productos de hidratación, el concreto se dilata y se fractura, la sección del acero se reduce, perdiendo resistencia a la tracción y a la fatiga, produciéndose la corrosión de armaduras.

g) Ataque por ácidos.- Durante el ataque ácido, los iones H^+ lixivian al hidróxido de calcio en el cemento, cuando la concentración de ácido es alta, ataca a los compuestos silico calcáreos hidratados descomponiéndolo en un gel de sílice sin resistencia y originando la formación de compuestos solubles de calcio. Por consiguiente, en ambientes con pH ácidos menores a seis, debe protegerse usando recubrimientos especiales y con pH de ácidos débiles, se debe usar cementos adicionados que presenten puzolanas y escorias de alto horno logrando que el cemento sea altamente alcalino con un pH 12 – 13

h) Reacción álcali agregado.- Es un fenómeno por el cual los álcalis como el óxido de sodio (Na_2O) y óxido de potasio (K_2O) del cemento o provenientes de los materiales que conforman el hormigón desde el exterior a través del agua reaccionan con algunos componentes que pueden estar presentes (agregados reactivos) ocasionando expansiones internas anormales produciendo fisuras, agrietamientos o pérdida de resistencia.

2.2.6 Cemento Tipo V

a) Alta resistencia a sulfatos.- El diseño de un cemento con cualidades resistentes a los sulfatos consiste en limitar el contenido en aluminato

tricálcico (C_3A), este criterio puede encontrarse en las normas ASTM y limita el contenido de C_3A a máximo 5%, esta limitación parcial indudablemente mejora la resistencia de los cementos frente a los sulfatos, pero no es suficiente cuando la agresividad de las aguas y terrenos es elevada. Este hecho ha obligado a los profesionales químicos del cemento a fabricar productos con mejores cualidades que aseguren la durabilidad del concreto.

El uso de una baja relación de materiales cementantes y la baja permeabilidad son fundamentales para el buen desempeño de cualquier estructura expuesta a los sulfatos. De lo contrario, incluso el concreto con cemento Tipo V sería incapaz de soportar una exposición severa a los sulfatos.

El cemento Portland Tipo V cumple con las siguientes normas:

1) Norma Técnica Peruana: NTP 334.009 y Norma Americana ASTM

C-150.- Características:

- Producto obtenido de la molienda conjunta de clinker Tipo V de bajo contenido de aluminato tricálcico y yeso
- Fabricado especialmente para obras en donde se requiere concreto de alta resistencia al ataque de sulfatos como: obras expuestas al agua de mar, al ambiente marino, a suelos y aguas con alto contenido de sulfatos (salitre)
- Bajo contenido de álcalis

- Se logran altas resistencias a la compresión, es usado en muchas aplicaciones. Además, tiene la capacidad de utilizarse en variados diseños de mezclas de concreto.
- Sus cualidades son ampliamente conocidas por el sector construcción civil peruano y extranjero.

2.2.7 Cementos Tipo V con escorias siderúrgicas

a) Escorias siderúrgicas.- La escoria de alto horno granulada es un subproducto derivado del proceso industrial para la producción de arrabio, que se forma cuando la escoria de alto horno fundida se enfría rápidamente por contacto con el agua.

En la fabricación de hierro, el alto horno produce dos productos: hierro fundido que se recoge en el fondo del horno y Escoria líquida que flota encima del depósito donde está el hierro. El horno a una temperatura de 1 400°C drena periódicamente ambos materiales.

Las potenciales propiedades de cementación de la escoria pueden conseguirse sólo si tras la fusión de dicha escoria se enfría apenas sale del alto horno. La refrigeración convierte la escoria en partículas granulares formadas principalmente por material vítreo cristalino. Este producto se llama escoria de alto horno granular. La propiedad de cementación de la escoria de alto horno granulada por la mayoría depende de su contenido de vidrio, que en un producto de calidad varía de 85% a un 99%. A mayor cantidad de vidrio incluida, mayor sería la calidad de la escoria.

Para optimizar el rendimiento de cementación se precisa moler la escoria granulada en polvo cuyo grosor es parecido al del cemento Portland.

Figura 2

Proceso de obtención de la escoria siderúrgica o alto horno



b) Composición química de las escorias.- La composición química de las escorias de alto horno es constante porque el proceso siderúrgico y su composición dependen mutuamente uno de otro. Las características de la escoria derivada de la producción de hierro de calidad que coinciden con aquellas requeridas para buenas propiedades de cementación.

En la **tabla 3 (Ver p. 35)** se destacan los principales óxidos presentes en las escorias; estos elementos tienen una estructura mineralógica compleja parecida a la del cemento Portland.

Tabla 3*Análisis químico de la escoria de alto horno*

País	SiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)
Brasil	33 - 44	34 - 43	2 - 7
Europa	30 - 38	33 - 47	2 - 10
Japón	31 - 40	38 - 45	2 - 8
Perú	24 - 37	38 - 44	5 - 7
USA y Canadá	32 - 40	29 - 42	8 - 19

Data empresa Caliza Cemento Inca S.A

c) Durabilidad:

- 1) Reactividad hidráulica.-** La escoria molida precisa tener un activador químico para el desarrollo de sus propiedades cementantes siendo el cemento Portland ordinario (OPC) el que se utiliza, mezclándolos en distintas proporciones se obtienen productos cuya hidratación es parecida al cemento OPC. Sin embargo las partículas de escoria molidas y amasadas con agua se hidratan más lentamente; pues de ellas derivan productos con características muy semejantes a un gel de silicato cálcico hidratado (CSH) que aumentan la densidad de la pasta de cemento fraguando y endureciendo, que son ventajas apreciables para la producción de concretos.
- 2) Reactividad álcali agregado (AAR).-** La reacción química entre los álcalis en el cemento Portland y ciertos tipos de minerales de sílice presentes en algunos agregados producen un gel higroscópico, que absorbe la humedad y cambia su volumen expandiéndose. Bajo ciertas

circunstancias, la formación del gel puede causar expansión y, eventualmente, grietas en el concreto.

Varios estudios sobre los concretos destacan que añadiendo un porcentaje de escoria de alto horno (aprox. 40%) se produce una reacción álcali-agregado, a causa de que la escoria molida es un excelente aglutinante hidráulico. Es necesario un álcali fuerte para empezar el proceso de hidratación de la escoria molida en el concreto como sería el hidróxido de calcio producido por el cemento. Las sales alcalinas presentes en la hidratación del cemento a su vez son utilizadas por la escoria molida en su propio proceso de hidratación y se enlazan en el gel insoluble C-S-H

El uso de la escoria molida es la mejor manera de mitigar la AAR ésta impide que se produzca mediante el uso adecuado de materiales en la mezcla de concreto. Una forma de prevenir este fenómeno es limitar el contenido de álcali del concreto minimizando la cantidad de álcali aportada por el cemento Portland.

3) Ataque por cloruros.- La penetración de iones cloro en pastas, morteros y hormigones de cemento siderúrgico es mucho más lenta. Esto se ha comprobado por ensayos basados en ciclos de inmersión intermitente de probetas en disoluciones de cloruro cálcico, alternados con secado al aire de las mismas (Calleja, 1982).

El deterioro del concreto a causa del ataque por los cloruros se limita a la superficie en la cual se produce un daño mecánico por la

formación de cristales en los vacíos y capilares, pero si hablamos de concreto armado el efecto es más serio porque si el ataque llega a las barras de acero (hierro), los productos que resultan de la corrosión tienen mayor volumen que el hierro original y se hace inevitable el desplazamiento del concreto. El hierro no se deteriora cuando está en un entorno muy alcalino en el cual hay altas concentraciones de iones hidroxílicos, formándose una capa protectora (pasivación) de óxido férrico en la superficie del hierro.

En presencia de cloruros esta capa protectora es eliminada por la formación de sales solubles de cloro, pues el hierro toma el potencial electroquímico del hierro que se deteriora libremente y se producen la corrosión; los cementos con escoria de alto horno permiten obtener concretos de medio alcalino (pH 12.5 - 13).

4) Agresión química por los sulfatos.- Se ha comprobado internacionalmente que los cementos con escorias de alto horno permiten obtener concretos y morteros con efectiva resistencia a los sulfatos a través de una refinación de la estructura del poro y una reducción del contenido de hidróxido de calcio.

El ataque de sulfato es una forma común de deterioro del concreto. Ocurre cuando el concreto entra en contacto con agua que contiene sulfatos (SO_4). Los sulfatos se pueden encontrar en suelos áridos, en agua de mar y en plantas de tratamiento de aguas residuales. Los sulfatos a base de agua reaccionan con los

productos de hidratación de la fase de aluminato tricálcico (C_3A) del cemento Portland y con hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ para formar un producto cristalino expansivo llamado etringita. La expansión debido a la formación de etringita provoca tensiones de tracción en el hormigón. Cuando estos esfuerzos se vuelven mayores que la capacidad de tensión del concreto, el concreto comienza a agrietarse. Estas grietas permiten la entrada fácil de más sulfatos en el concreto y el deterioro se acelera. Los sulfatos también causan la desintegración química de algunos de los productos de hidratación del cemento.

Una de las formas más comunes de protección contra el ataque de sulfato es reducir el contenido de alúmina limitando el C_3A en el cemento Portland. El cemento Portland Tipo II (con C_3A entre 5% y 8%) y el cemento Portland Tipo V (con C_3A menos del 5%) se han especificado para ambientes de sulfato moderados y severos, respectivamente. Siendo el uso de cemento de escoria una forma efectiva de reducir el potencial de ataque de sulfato.

El cemento con escoria reduce la formación de macroporos al 50% que un cemento convencional dificultando la penetración de cloruros, sulfatos y gases como CO_2 al concreto disminuyendo así la permeabilidad.

2.3 Conceptual

En las últimas décadas las normas para la fabricación de cemento han evolucionado mostrando al cliente final materiales con mejor desempeño, es así que esta normatividad ha cambiado de la clásica ASTM C 150 “Especificación Normalizada para Cemento Portland” que evalúa al cemento por su composición química y cualidades resistentes, mientras que la producción de cemento fabricado bajo la norma ASTM C 1157 “Especificación Normalizada de Desempeño para Cemento Hidráulico” establece sólo requisitos por desempeño, es decir define las cualidades del cemento en función al concreto elaborado; esto obedece a las últimas tendencias mundiales en la que se tienen que fabricar cementos amigables con el medio ambiente sin perder sus propiedades resistentes, debido a esto las fábricas de cementos optan por el desarrollo de cementos que ofrezcan al mercado materiales con mejor desempeño.

Para el desarrollo de esta investigación, se ha contemplado la comparación de dos tipos de cemento, evaluando la expansión lineal de las barras de mortero mediante el cambio de longitud de éstas, frente a la agresión química de los sulfatos. El método muestra cómo las reacciones químicas del sulfato con las fases mineralógicas del cemento producen el fenómeno de expansión, que causa el deterioro prematuro de estructuras de concreto.

Este ensayo ha sido seleccionado para demostrar como el cemento Portland Tipo V muestra menor desempeño que un cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas, para ello se realiza el ensayo descrito en la norma ASTM C 1012 y la Norma Técnica Peruana NTP 334.094–2017 Este

ensayo es determinante para evaluar la durabilidad del concreto que se pretenda fabricar y como mejora la vida útil de una construcción.

Para el desarrollo del presente trabajo, se tomarán dos muestras de cemento:

- a) Cemento Portland Tipo V
- b) Cemento Portland Tipo V modificado con escoria siderúrgica

El método consiste en realizar el ensayo para determinar el cambio de longitud en morteros de Cemento Portland expuestos a soluciones sulfatadas.

2.4 Definición de términos básicos

- a) **Clinker.**- Es el ingrediente principal del cemento, son gránulos endurecidos que se obtiene como resultado de la calcinación en horno, de mezclas de caliza (80%) y arcilla (20%) a una temperatura entre 1 350°C y 1 450°C preparadas artificialmente con adición eventual de aditivos. El clínter es el producto del horno que se muele para fabricar el cemento Portland.
- b) **Yeso.**- Es un producto elaborado a partir de un mineral natural denominado igualmente yeso o aljez (sulfato de calcio dihidratado: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), mediante deshidratación. El yeso, se agrega generalmente al Clinker para regular el fraguado.
- c) **Caliza.**- Roca sedimentaria formada por la precipitación del Carbonato Cálcico (CaCO_3) Se considera caliza o material calcáreo aquel que presente un valor de titulación de CaCO_3 mayor de 75%. Se utiliza Caliza por su aporte de CaO al crudo y mejor es la caliza cuanto más CaO aporte.

- d) Escoria (EAH o Slag).**- La escoria es utilizada en la fabricación del cemento, ya sea como un componente de cemento separado o como parte de un cemento mezclado. Funciona conjuntamente con el cemento portland para aumentar la resistencia, reducir la permeabilidad, mejorar la resistencia al ataque químico e inhibir la corrosión del corrugado.
- e) Puzolana.**- La puzolana natural es un mineral silíceo ligero que se genera durante las erupciones volcánicas de lava basáltica. Contiene sílice, alúmina, óxido de hierro, cal y óxido de magnesio. La puzolana se utiliza como aditivo del cemento.
- f) Fraguado.**- Proceso de endurecimiento del mortero o del concreto en la que la mezcla pierde su plasticidad.
- g) Barras de mortero.**- Probetas de forma prismática compuestas por mezcla de cemento, arena estándar y agua, fabricadas de acuerdo a las normas ASTM C 1012
- h) Concreto.**- Mezcla de cemento, arena, grava, agua y aditivos produciéndose una masa plástica moldeable que endurece e incrementa su resistencia con el tiempo.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

Los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas son menores que los cambios de longitud obtenidos con el cemento Portland Tipo V cuando se exponen a la agresión química de los sulfatos.

3.1.2 Hipótesis específicas

- a) El cemento Tipo V experimenta cambios de longitud significativos que fluctúan entre 0,004% y 0,033% medidos entre los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días.
- b) El cemento Tipo V modificado con escorias siderúrgicas presenta menores cambios de longitud que fluctúan entre 0,003% y 0,025% medidos entre los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días.
- c) El análisis comparativo de los resultados de los cambios de longitud de las barras de mortero determina que el cemento Portland Tipo V con escoria presenta un mejor comportamiento expansivo frente a la agresión química de los sulfatos.

3.2 Definición conceptual de variables

3.2.1 Operacionalización de las variables

1) Variables independientes

X_1 : Tipos de cemento

X_2 : Tiempo de exposición en la solución de sulfato de magnesio (en días)

2) Variables dependientes

Y : Cambio de longitud de las barras (expresado en porcentaje)

$$Y = F (X_1, X_2)$$

La operacionalización para esta investigación se encuentra en la tabla 4:

Tabla 4

Operacionalización de las variables

Variables independientes	Dimensiones	Indicadores	Método	Instrumentos
X_1 : Tipos de cementos	Dos tipos de cementos	Número de barras de morteros	Ensayos en el laboratorio.	Moldes de acero
X_2 : Tiempo	Mediciones de tiempo Inicial: 24 horas Final: 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días	Días calendario	Ensayos en el laboratorio.	Calendario
Variable Dependiente	Dimensiones	Indicadores	Método	Instrumentos
Y : Cambios de Longitud	Medición inicial y final	Lecturas en el reloj comparador de longitudes	Ensayos en el laboratorio	Reloj comparador de longitudes

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1 Tipo y diseño de investigación

Es del tipo aplicada y cuantitativa porque las variables de la investigación son cuantitativas.

Esta investigación fue diseñada para que se desarrolle de manera experimental. Para analizar el comportamiento expansivo causado por la agresión química de los sulfatos, se optó por aplicar el método descrito por la Norma ASTM 1012 y Norma Técnica Peruana NTP 334.094–2017. Se tomaron una muestra de cemento Portland Tipo V elaborado en el laboratorio en cuya dosificación se incluyó escoria de alto horno de procedencia japonesa y otra de cemento Portland Tipo V del mercado y se procedió a la experimentación.

4.2 Método de investigación

Esta investigación se realizará en los laboratorios de calidad de una empresa cementera y se desarrollará en tres etapas:

4.2.1 Primera etapa

En la primera etapa de la investigación se revisó la teoría vinculada a la variable de investigación. Que en éste será la variable X_1 , con el propósito de identificar algunos argumentos científicos, antecedentes de estudio y bases científicas.

4.2.2 Segunda etapa

En la segunda etapa de la investigación se volvió a requerir de la revisión de la teoría vinculada a las variables de investigación, con el propósito

de relacionar algunos argumentos científicos, antecedentes de estudios y bases científicas. En esta etapa se identifican las variables X_2 y Y

También se procedió con las entrevistas a especialistas en el tema, para conocer sus criterios vinculados a las variables de investigación y a los responsables de la generación del objeto de investigación. Se procede a la elaboración de las barras de morteros y a la realización de los ensayos determinados para la investigación.

4.2.3 Tercera etapa

En la tercera etapa de la investigación con la teoría y la información lograda tanto en la primera etapa como en la segunda etapa, se realizó un riguroso análisis de la información e interpretación de los resultados. En esta etapa se identifica a las variables X_1 , X_2 y Y (**Ver figura 3 p. 46**)

4.3 Población y muestra

Población: No corresponde, porque se tomaron muestras.

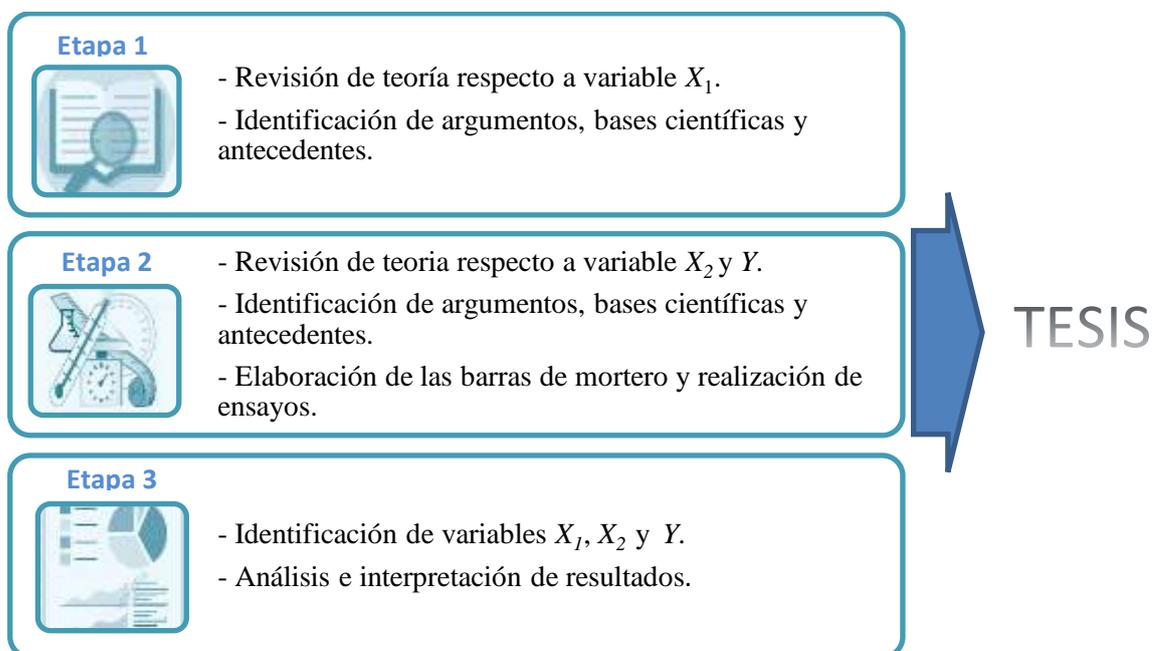
Muestra: Las muestras tomadas para la siguiente investigación son los cementos Portland Tipo V y otra de cemento Portland Tipo V modificada con escoria siderúrgica.

4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado

Esta investigación se realizó en los laboratorios de calidad de una empresa cementera ubicada en Huachipa, distrito de Lurigancho-Chosica. Se desarrolló entre los años 2018 y 2019.

Figura 3

Método de investigación por etapas



4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

La técnica que se utilizó para el desarrollo de este trabajo fue el ensayo descrito en las normas ASTM C1012 y la Norma Técnica Peruana NTP 334.094–2017; se usaron equipos de medición e instrumentos del laboratorio de la empresa cementera. Los datos obtenidos se registraron en hojas de control tabuladas por fechas. Posteriormente los datos se depuran en el software ofimático Microsoft Excel y el Software IBM SPSS Statistics 26.

a) Materiales y reactivos

- 1) Arena Ottawa (ASTM C 778)

- 2) Muestras de cemento en estudio
- 3) Solución de sulfato de magnesio de concentración (50 g/L)
- 4) Moldes dobles de acero
- 5) Pines de acero 316
- 6) Apisonador
- 7) Guantes de jebe
- 8) Espátula
- 9) Badilejo
- 10) Probeta de 1 litro

b) Equipos

- 1) Mezcladora mecánica
- 2) Recipiente de acero inoxidable (4.73 litros)
- 3) Paleta de mezcla
- 4) Balanza analítica con aproximación de 0.1 g
- 5) Aparato de medición de la longitud (Reloj comparador de longitud)
- 6) Barra referencial
- 7) Mesa de flujo
- 8) Cámara de curado

4.6 Análisis y procesamiento de datos

El desarrollo del método consiste en efectuar el ensayo para determinar el cambio de longitud en morteros de cemento Portland expuestos al ataque de sulfatos. Se tomaron dos muestras de cemento:

- a) Cemento Portland Tipo V
- b) Cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas

Para este ensayo se prepararon 3 barras de mortero que fueron elaboradas con ambos tipos de cementos, preparando una mezcla de mortero (cemento, arena y agua) cuya dosificación consiste de 740 g de cemento, 2 035 g de arena Ottawa (ASTM C 778) y agua suficiente para obtener una fluidez de $110\% \pm 5\%$; luego de batir la mezcla verterla en los moldes de acero para barras cuyas dimensiones son de 25,4 mm x 25,4 mm x 285,75 mm, previamente engrasados de modo que se obtenga una distribución homogénea del espécimen, apisonando y alisando la superficie del molde con ayuda de una espátula para eliminar el material en exceso y usando la mesa de flujo estándar.

Luego, llevar las muestras preparadas a la cámara de curado por 24 horas, desmoldar, rotularlas y colocar las barras en inmersión en un contenedor de almacenamiento en el que se dispone de una solución de sulfato de magnesio en una concentración de 50 g/L para simular la exposición ambiental; después de tres días se extrae la barra, se seca superficialmente con un paño y se procede a realizar la primera medición con el reloj comparador de longitudes como se muestra en la **figura 4 (Ver p. 49)**

Se retornar la barra a la solución de sulfato de magnesio y se repite el procedimiento para los siguientes periodos 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días para cada tipo de cemento en estudio.

Para las lecturas de este ensayo se prepararon tres barras de mortero por cada tipo de cemento, las lecturas de las muestras son reportados por triplicado y se compararon la desviación estándar de la media y el promedio

aritmético de las tres probetas ensayadas, dichos cálculos se realizaron en el software ofimático Microsoft Excel.

Figura 4

Mediciones de las barras de mortero con reloj comparador de longitudes



Además se empleó el Software IBM SPSS Statistics 26 para el tratamiento estadístico de datos, para un mejor análisis correlacional entre las variables.

V. RESULTADOS

5.1 Resultados descriptivos

Las lecturas obtenidas tras la realización de los ensayos efectuados a las seis barras de morteros fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escoria siderúrgica, siguiendo los parámetros de las normas ASTM C1012 y la Norma Técnica Peruana NTP 334.094–2017, que corresponden a la lectura inicial y a las posteriores lecturas obtenidas después de la inmersión de las barras en la solución de sulfato de magnesio ($MgSO_4$) de concentración (50 g/L) medidas con el reloj comparador en los tiempos de 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días. Las lecturas de las muestras son reportadas por triplicado (**ver anexo 2**) Las mediciones en el reloj comparador están dados en porcentaje

Para calcular el cambio o variación de la longitud (expansión lineal) de las barras de mortero fabricadas con los dos tipos de cementos a los tiempos de 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días se aplicó la fórmula siguiente:

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100$$

Donde:

ΔL : Cambio de longitud al tiempo x en porcentaje %

L_x : Lectura del reloj comparador del espécimen a la edad x –
Lectura en reloj comparador de la barra de referencia

L_i : Lectura inicial del comparador de longitudes al espécimen
– lectura del reloj comparador de la barra de referencia al mismo tiempo

Lg : Longitud de base nominal del molde.(10 pulg)

Los cambios de longitud son reportados en porcentajes.

5.1.1 Determinación de los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V a los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días

Realizado el método de ensayo de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP334.094–2017 para las tres barras de mortero fabricadas con cemento Tipo V y el cálculo según la norma, se obtuvo con los resultados que se muestran en la **tabla 5**

Se obtuvo la desviación estándar de la media obteniéndose valores menores a 0,009 como lo requiere la NTP para cementos Tipo V y el promedio aritmético de las tres probetas del cemento Tipo V ensayadas.

Tabla 5

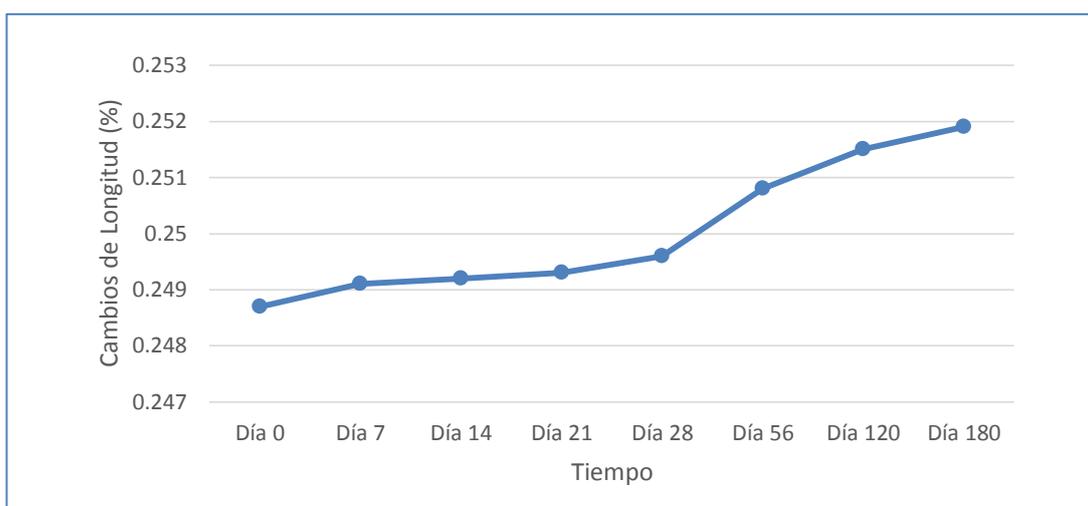
Cambios de longitud de las barras de cemento Portland Tipo V.

Cambios de longitud (%) Cemento Tipo V				
Tiempo	Media	D.S.	Mín.	Máx.
Día 0	0,2487	0,0039	0,2456	0,2530
Día 7	0,2491	0,0039	0,2460	0,2535
Día 14	0,2492	0,0039	0,2461	0,2536
Día 21	0,2493	0,0039	0,2463	0,2537
Día 28	0,2496	0,0039	0,2466	0,2540
Día 56	0,2508	0,0040	0,2478	0,2553
Día 120	0,2515	0,0039	0,2484	0,2559
Día 180	0,2519	0,0040	0,2487	0,2564

En la **figura 5**, se muestra los resultados de los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V, en función del tiempo de exposición de las barras en la disolución agresiva de sulfato.

Figura 5

Cambios de longitud de las barras de cemento Portland Tipo V



5.1.2 Determinación de los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas a los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días

Realizado el método de ensayo de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP334.094 – 2017 para las tres barras de mortero fabricadas con cemento Tipo V modificado con escoria y el cálculo de acuerdo a dicha norma, se obtuvieron los resultados mostrados en la **tabla 6 (Ver p. 53)**

Se calcularon la desviación estándar de la media obteniéndose valores menores a 0,028 como lo requiere la NTP y el promedio aritmético de las tres probetas del cemento Tipo V modificado con escorias siderúrgicas ensayadas.

Tabla 6

Cambios de longitud - cemento Tipo V modificado con escorias siderúrgicas

Cambios de longitud (%) Cemento Tipo V modificado				
Tiempo	Media	D.S.	Mín.	Máx.
Día 0	0,2516	0,0088	0,2430	0,2605
Día 7	0,2519	0,0087	0,2433	0,2607
Día 14	0,2520	0,0087	0,2434	0,2608
Día 21	0,2522	0,0087	0,2436	0,2610
Día 28	0,2525	0,0088	0,2438	0,2614
Día 56	0,2533	0,0088	0,2446	0,2622
Día 120	0,2540	0,0088	0,2453	0,2628
Día 180	0,2542	0,0088	0,2454	0,2630

En la **figura 6 (Ver p. 54)** se muestra los resultados de los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V modificado con escoria siderúrgica, en función del tiempo de exposición de las barras en la disolución agresiva de sulfato.

5.2 Resultados inferenciales

5.2.1 Realización de análisis comparativo de los resultados de los cambios de longitud de las barras de morteros fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas, según los tipos de cemento

En la **Tabla 7 (Ver p. 54)** se muestra el análisis comparativo en donde no hay diferencia estadísticamente significativa entre los valores promedios de los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas, según los tipos de cemento (Prueba T para muestras independientes), pudiéndose visualizar en la **figura 7 (Ver p. 55)**

Figura 6

Cambios de longitud de las barras- cemento Tipo V mod. con escorias siderúrgicas

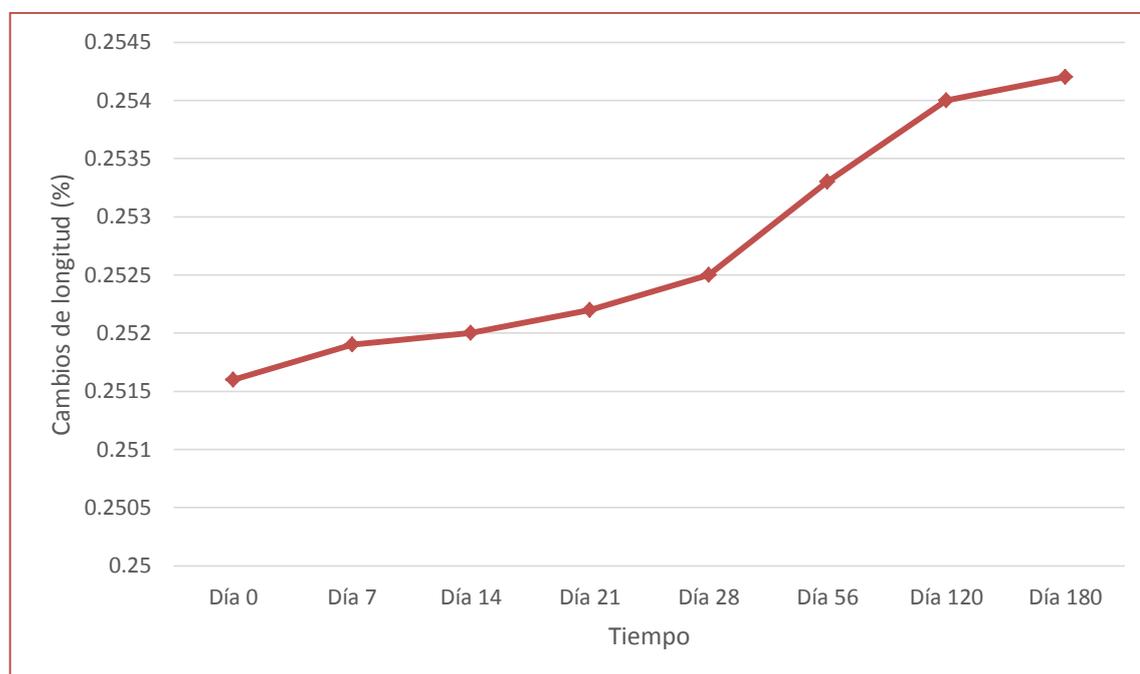


Tabla 7

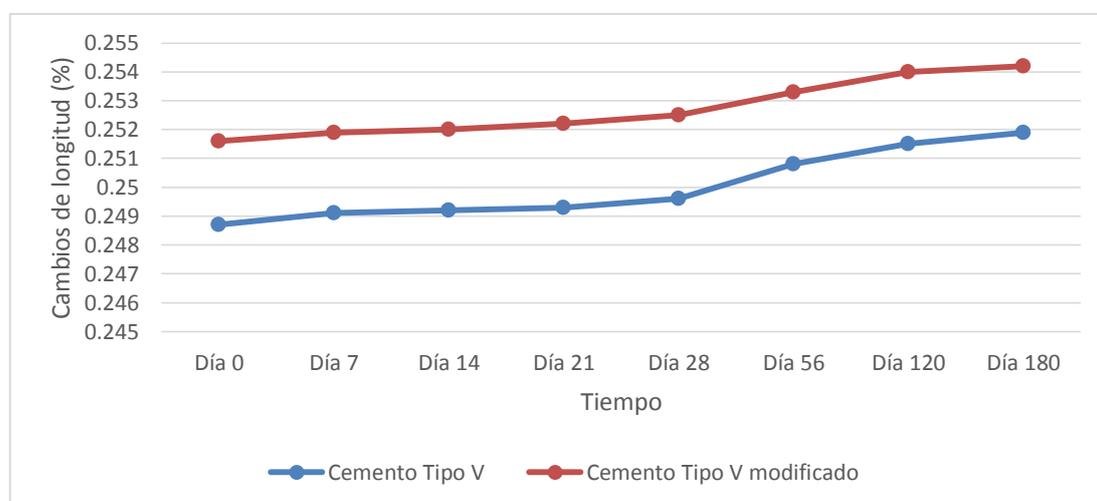
Comparativo de valores promedios de cambios de longitud según los tipos de cemento

Tiempo	Cambios de longitud (%)		Valor p
	Cemento Tipo V Media	Cemento Tipo V modificado Media	
Día 0	0.2487	0.2516	p>0.05
Día 7	0.2491	0.2519	p>0.05
Día 14	0.2492	0.2520	p>0.05
Día 21	0.2493	0.2522	p>0.05
Día 28	0.2496	0.2525	p>0.05
Día 56	0.2508	0.2533	p>0.05
Día 120	0.2515	0.2540	p>0.05
Día 180	0.2519	0.2542	p>0.05

*Prueba T para muestras independientes

Figura 7

Valores promedios de cambios de longitud según los tipos de cemento



En la **tabla 8 (Ver p. 56)** se observa los resultados obtenidos de los cambios de longitud de las barras fabricadas con ambos tipos de cementos en función del tiempo en el medio agresivo al que fueron sometidas, se realizó el análisis estadístico usando el software IBM SPSS Statistics 26 para Prueba T para muestras independientes y Prueba de U de Mann-Whitney mediante el cual se puede afirmar que hay diferencia estadísticamente significativa entre las diferencias promedio de los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas, según los tipos de cemento.

La diferencia de los cambios de longitud en los días 7, 56, 120 y 180 días respecto al tiempo inicial 0 es mayor para el cemento Portland Tipo V al ser comparado con el cemento Tipo V modificado con escorias siderúrgicas, como se observa en la **Figura 8 (Ver p. 56)**

Tabla 8

Comparativo diferencias promedio de cambios de longitud según los tipos de cemento

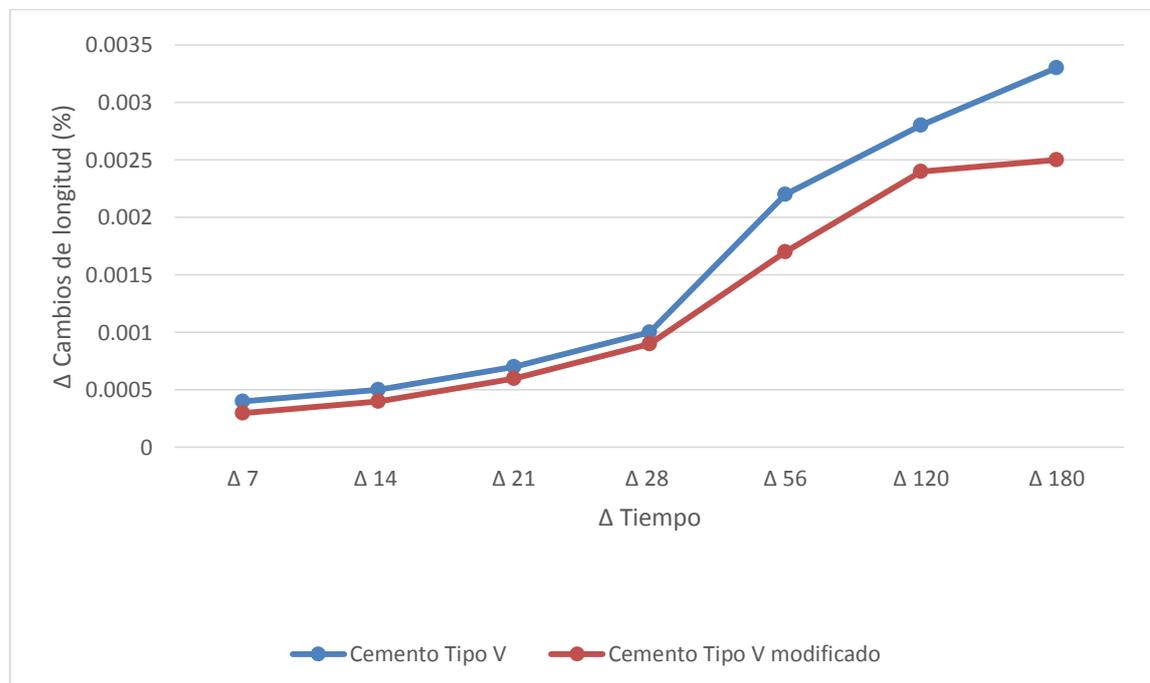
Δ Tiempo	Δ Cambios de longitud (%)		Valor p
	Cemento Tipo V Media	Cemento Tipo V modificado Media	
Δ 7	0,004	0,003	p < 0,05*
Δ 14	0,005	0,004	p > 0,05*
Δ 21	0,007	0,006	p > 0,05*
Δ 28	0,010	0,009	p > 0,05**
Δ 56	0,022	0,017	p < 0,05*
Δ 120	0,028	0,024	p < 0,05*
Δ 180	0,033	0,025	p < 0,05*

*Prueba T para muestras independientes

**Prueba de U de Mann-Whitney

Figura 8

Diferencias promedio de cambios de longitud según los tipos de cemento

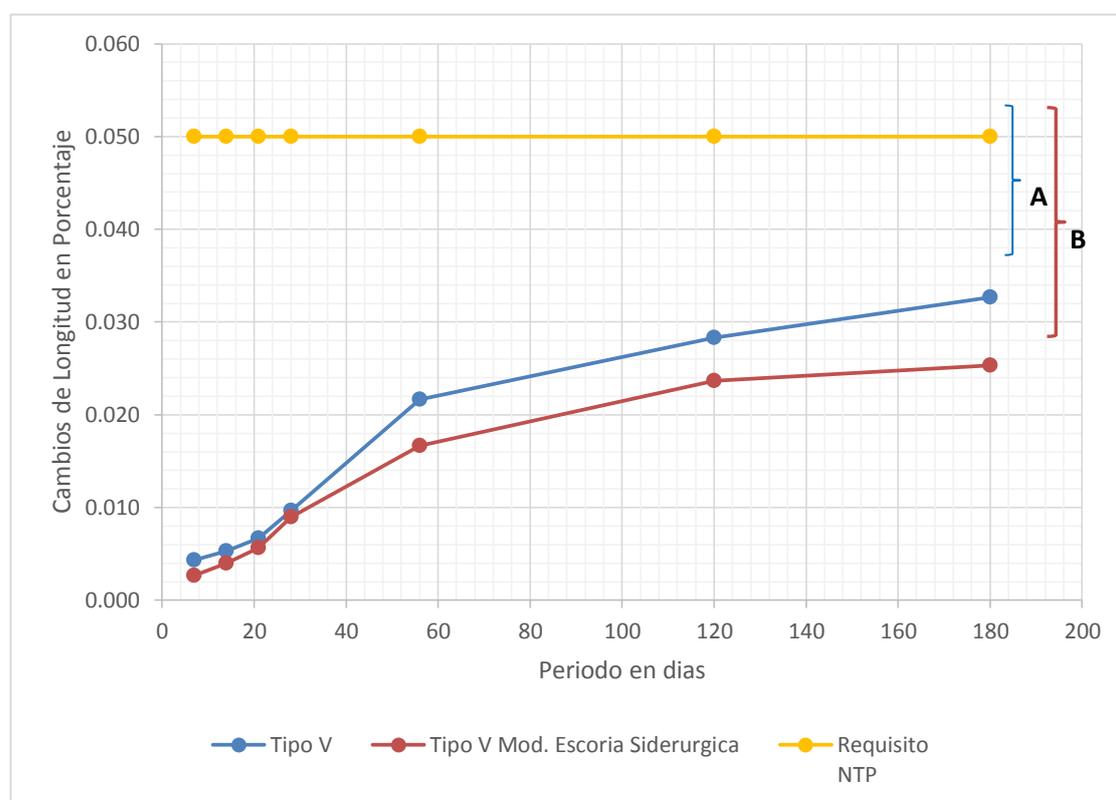


Se realiza la comparación de la expansión de ambos tipos de cementos, verificándose el cumplimiento de los requisitos establecidos por las Normas Técnicas Peruanas NTP 334.082 y NTP 334.009 (**Ver anexo 3**) En ellas, se especifica que los cambios de longitud deben ser menores a 0,050%, como se observa en la **figura 9**

También se observa que el cemento Portland Tipo V modificado con escoria siderúrgica presenta un mejor comportamiento al ser expuesto a una solución de sulfatos cumpliendo holgadamente el requisito especificado en las normas.

Figura 9

Cambios de longitud de cemento Tipo V y Tipo V modificado respecto a NTP



Nota: Esta figura muestra la comparación de los cambios de longitud del cemento Tipo V y Tipo V modificado con escoria siderúrgica; respecto a NTP.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis

1) **Hipótesis general.**- En el presente estudio, se planteó como hipótesis general que los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas fueron menores que los cambios de longitud obtenidos con el cemento Portland Tipo V cuando se exponen a la agresión química de los sulfatos; se encontró diferencias estadísticamente significativas entre los valores de ambos grupos de experimentación; en el cual, se obtuvo un cambio de longitud de 0,025% para el cemento Tipo V modificado con escoria siderúrgica y de 0,033% para el cemento Tipo V, aceptando la hipótesis alterna y rechazando la hipótesis nula.

2) **Hipótesis específicas:**

- a) El cemento Tipo V presentó cambios de longitud significativos que fluctuaban entre 0,004% y 0,033% en cada uno de los tiempos medidos.
- b) El cemento Tipo V con escorias siderúrgicas presentó cambios de longitud entre los valores de 0,003% y 0,025% en los tiempos de medición planteados.
- c) Al comparar los resultados de los cambios de longitud de las barras de mortero, se puede deducir que el cemento Portland Tipo V modificado con escoria siderúrgica presentó un mejor comportamiento expansivo frente a la agresión química de los sulfatos; debido a que, el incremento del cambio de longitud o expansión lineal de las barras de

mortero fue menor, inhibiendo la formación de etringita, lo que ratifica que la escoria reduce la formación de macroporos dificultando la penetración de sulfatos al concreto disminuyendo su permeabilidad.

6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares

En este estudio se encontró que los cambios de longitud del cemento Portland Tipo V modificado con escoria siderúrgica fueron menores que las del cemento Portland Tipo V presentando un mejor comportamiento expansivo. Al comparar los valores máximos del cambio de longitud a 180 días que fue de 0,025% se constata que se encuentra muy por debajo del valor requerido en las Normas ASTM C 1012 y NTP 334094–2017.

Chen et al. (2017), al investigar el nivel de daños que se producen en los materiales de construcción hechos a base de cemento indicaron que el deterioro de los morteros de cemento sumergidos en una solución de sulfato es causado por el ataque químico y físico de la solución sulfatada. La presente investigación se asemeja en los efectos del daño causado en las barras de morteros al producirse la expansión de estos.

Los resultados de un mejor desempeño del cemento Portland Tipo V modificado con escoria siderúrgica resultan similares a los de Al-Swaidani y Dib Aliyan (2015) donde comprobaron el efecto beneficioso de la adición de escoria como reemplazo del cemento en cuanto a sus propiedades de durabilidad. La evaluación de la resistencia a los sulfatos de barras morteros se realizó sumergiéndolos en una solución de Na_2SO_4 al 5% durante 52 semanas; a diferencia de este estudio, en el cual, se usó una solución de MgSO_4 y un menor tiempo de exposición; sin embargo, los resultados de las pruebas

revelaron que los concretos que contienen cementos modificados a base de escoria, mostraron períodos de iniciación de deterioro mucho más largos que los del cemento Portland simple.

Asimismo, los resultados coinciden con el estudio realizado por López (2015), quién al desarrollar el método de ensayo de cambio de longitud para cementos resistentes y no resistentes a la agresión química de los sulfatos, de la norma ASTM C1012, verificó que los valores de expansión a 6 meses son inferiores a 0,05% para un cemento europeo Tipo IS(MS), cumpliendo con los requerimientos de dicha norma.

Una similitud en cuanto a la realización del método de ensayo se observa en el trabajo de Guevara y Tantarico (2019). La diferencia respecto a este estudio es por el tipo de cemento utilizado, siendo el Portland Tipo I cuyos valores de expansión presentados oscilan entre 0,011% y 0,116% Cortez y Sánchez (2006), realizaron pruebas físicas y químicas para la fabricación de cementos resistentes a medios agresivos como los sulfatos; en el cual, hacen referencia de las propiedades de la escoria destacando la calidad óptima de este tipo de cemento, sujeto de estudio en la presente investigación.

6.3 Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes

El progreso de la ciencia depende de la honestidad y de la integridad; durante la práctica científica en la validación de información y resultados de la investigación. El presente trabajo está basado en el cumplimiento ético garantizando lo realizado en favor de la sociedad, de acuerdo al Reglamento

del Código de Ética de la investigación de la Universidad Nacional del Callao,
según Resolución de Consejo Universitario N°260–2019–CU

VII. CONCLUSIONES

- 1) El cambio de longitud de las barras de morteros fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas frente a la agresión química de los sulfatos fueron de 0.033% para el cemento Tipo V y de 0,025% para el cemento Tipo V modificado con escoria siderúrgica.
- 2) Los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V fluctuaron entre 0,004% y 0,033% en cada uno de los tiempos medidos.
- 3) Los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas presentó cambios de longitud entre los valores de 0,003% y 0,025% en los tiempos de medición planteados.
- 4) Comparando los resultados de los cambios de longitud de las barras de mortero, se deduce que el cemento Portland Tipo V modificado con escoria siderúrgica presentó un mejor comportamiento expansivo frente a la agresión química de los sulfatos encontrándose que la variación del cambio de longitud o expansión lineal de las barras de mortero fue menor, inhibiendo la formación de etringita, lo que ratifica que la escoria reduce la formación de macroporos dificultando la penetración de sulfatos al concreto y disminuyendo su permeabilidad. Según la clasificación de los cementos por el tipo de desempeño de acuerdo a la NTP 334.082 (ASTM C 1157) este cemento corresponde al Tipo HS por ser de alta resistencia a los sulfatos.

VIII. RECOMENDACIONES

- 1) Realizar el ensayo para determinar el cambio de longitudes de barras de mortero para edades mayores y tener una mejor visualización de los efectos de la agresión química producida por los sulfatos.
- 2) Estudiar el comportamiento expansivo de otros tipos de cemento existentes en el mercado y realizar sus respectivas comparaciones.
- 3) Realizar investigaciones evaluando el comportamiento físico, químico y mecánico de materiales cementantes suplementarios derivados de otros procesos industriales, aplicables a la producción de cementos de alto desempeño como métodos alternativos para la mitigación de los pasivos ambientales generados.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute. (1992). ACI 201.2R-92. *Guía para concreto duradero*. Farmington Hills, Michigan.
- Al-Swaidani¹, A.M., y Dib Aliyan, S. (2015). Effect of Adding Scoria as Cement Replacement on Durability-Related Properties. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(2), 241–254
<https://doi.org/10.1007/s40069-015-0101-z>
- Arrollo, J.C., Morán, F., García, A. (2019). *Jiménez Montoya Esencial Hormigón Armado*. Madrid, España. Editorial CINTER. 16^a ed.
- Asociación de Productores de Cemento ASOCEM (2016). ¿Cuál es el proceso de fabricación del cemento? Perú. Recuperado Octubre 10, 2017
<http://www.asocem.org.pe/productos-a>
- American Society for Testing and Materials. (2001). ASTM C989-99. Especificación estándar para escoria de alto horno granulada molida para su uso en concreto y morteros. West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. (2001). ASTM C1012-95^a. Método de prueba estándar para el cambio de longitud de morteros de cemento hidráulico expuestos a una solución de sulfato. West Conshohocken, PA.
- Calleja, J. (1982). Escorias y cementos siderúrgicos. *Materiales de Construcción*, 32(186), 11–36
<https://doi.org/10.3989/mc.1982.v32.i186.1024>
- Cortez, M., y Sánchez, J. (2006). Mejoramiento en las propiedades físicas y químicas del cemento portland Tipo MS por adición de Clinker Tipo V en la sustitución de escoria BSF de alto horno (Tesis de grado). Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
- Chen, F., Gao, J., Qi, B., y Shen, D., (2017). Deterioration mechanism of plain and blended cement mortars partially exposed to sulfate attack.

Construction and Building Materials, 154, 849–856
DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.017

- Fernández, M. (2004). Durabilidad del Hormigón en Ambiente Marino. *Cemento hormigón* 894, 48-60
- Guevara, V., y Tantarico, M. (2019). Evaluación comparativa de las características físico - mecánicas de las diferentes marcas de cementos portland Tipo I comercializadas en el norte y centro del Perú, 2018 (Tesis de grado). Universidad Señor de Sipán, Perú
- Gruyaert, E., Van den Heede, P., Maes, M., y De Belie, N.(2012). Investigation of the influence of blast-furnace slag on the resistance of concrete against organic acid or sulphate attack by means of accelerated degradation tests. *Cement and Concrete Research*, 42, 173–185
- Instituto Nacional de la Calidad. INACAL (2011). Norma Técnica Peruana NTP 334.090:2016 CEMENTOS. Cementos Pórtland adicionados. Requisitos (Basado: ASTM C595 / C595M - 16). Perú.
- López, P. (2015). Estudio sobre la durabilidad de los nuevos tipos de cemento para la evaluación del comportamiento de morteros y hormigones frente a la agresión química de los sulfatos y del agua de mar (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Mehta, P. K., y Monteiro, J.P. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. New York. cuarta edición McGraw-Hill Education
<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071797870>
- Ochoa R., y Flores, E. (1995). Química del Cemento. Parte 2. *Revista de Química*, 9(1), 29 – 38. Recuperado a partir de:
<http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/8353>
- Puertas, F. (1993). Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. *Materiales de construcción*, 43(229), 37 – 48
<https://doi.org/10.3989/mc.1993.v43.i229.687>

- Ramezaniyanpour, A.M., Hooton,R.D., (2013). Resistencia al sulfato de cementos de piedra caliza Portland en combinación con materiales cementosos suplementarios. *Mater Struct* 46, 1061 – 1073
<https://doi.org/10.1617/s11527-012-9953-8>
- Rodríguez, E., Bernal, S., Mejía, R., y Puertas F. (2008). Hormigón alternativo basado en escorias activadas alcalinamente. *Materiales de Construcción*, 58, 291, 53 – 67
<https://doi.org/10.3989/mc.2008.v58.i291.104>
- Taylor, H.F. (2001). *La Química del Cemento*. Enciclopedia de la Química Industrial. Bilbao, España. Ediciones URMO.
- Taylor, H.F, Famy, C., y Scrivener, K. (2001). Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Reserarch*, 31(5), 683–693 DOI:10.1016/S0008-8846(01)00466-5

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia

TEMA: EVALUACION DE LOS CAMBIOS DE LONGITUD DE BARRAS DE MORTERO FABRICADAS CON CEMENTOS PORTLAND TIPO V Y TIPO V MODIFICADO CON ESCORIAS SIDERÚRGICAS FRENTE A LA AGRESIÓN QUÍMICA DE LOS SULFATOS.

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuáles son las diferencias en los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas expuestas a una solución de sulfatos?	Evaluar el cambio de longitud de las barras de morteros fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas frente a la agresión química de los sulfatos.	Los cambios de longitud de las barras de mortero, fabricadas con cemento Tipo V modificado con escorias siderúrgicas son menores que los cambios de longitud obtenidos con el cemento Portland Tipo V cuando se exponen a la agresión química de los sulfatos.	Y Los cambios de longitud de las barras	Medición inicial y medición final	Lectura en el Reloj comparador de longitudes	Ensayos en el laboratorio.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
a) ¿Cuáles son los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V a los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días?	a) Determinar los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V a los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días?	a) El cemento Portland Tipo V experimenta cambios de longitud significativos que fluctúan entre 0.004 y 0.033% medidos entre los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días	X ₁ Los tipos de cementos	Cemento Portland Tipo V	Número de barras morteros	Ensayos en el laboratorio.
b) ¿Cuáles son los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas con cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas a los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días?	b) Determinar los cambios de longitud de las barras de mortero fabricadas cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas a los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días?	b) El cemento Portland Tipo V con escorias siderúrgicas presenta cambios de longitud que fluctúan entre 0.003 y 0.025% entre los 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días		Cemento Portland Tipo V modificado con escorias siderúrgicas	Número de barras morteros	Ensayos en el laboratorio.
c) ¿Cuál es el análisis comparativo de los resultados de los cambios de longitud de las barras de morteros fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas?	c) Realizar un análisis comparativo de los resultados de los cambios de longitud de las barras de morteros fabricadas con los cementos Portland Tipo V y Tipo V modificado con escorias siderúrgicas, según los tipos de cemento.	c) El análisis comparativo de los resultados de los cambios de longitud de las barras de mortero determina que el cemento Portland Tipo V con escoria presenta un mejor comportamiento expansivo frente a la agresión química de los sulfatos.	X ₂ El tiempo	Mediciones de tiempo Inicial: 24 horas Final: 7, 14, 21, 28, 56, 120 y 180 días	Calendario	Ensayos en el laboratorio.

Anexo 2

Lecturas de las barras de morteros

a) Lecturas de las barras de morteros fabricadas con cemento Portland Tipo V

Tiempo en días	Tipo V		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
0	0,2456	0,2530	0,2474
7	0,2460	0,2535	0,2478
14	0,2461	0,2536	0,2479
21	0,2463	0,2537	0,2480
28	0,2466	0,2540	0,2483
56	0,2478	0,2553	0,2494
120	0,2484	0,2559	0,2502
180	0,2487	0,2564	0,2507

b) Lecturas de las barras de morteros fabricadas con cemento Portland Tipo V modificados con escoria siderúrgica

Tiempo en días	Tipo V Mod Escoria Siderúrgica		
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
0	0,2605	0,2430	0,2514
7	0,2607	0,2433	0,2517
14	0,2608	0,2434	0,2519
21	0,2610	0,2436	0,2520
28	0,2614	0,2438	0,2524
56	0,2622	0,2446	0,2531
120	0,2628	0,2453	0,2539
180	0,2630	0,2454	0,2541

Anexo 3

Normas Técnicas Peruanas

- a) Expansión por sulfatos según Norma Técnica Peruana NTP 334.082.

NORMA TÉCNICA
PERUANA

NTP 334.082
14 de 14

- A* Tanto la cantidad de retenido sobre malla 45 μm (Nº 325) como la superficie específica mediante el aparato de Permeabilidad de Aire en m^2/kg , se reportarán en todos los certificados de resultados de ensayos solicitados al fabricante.
- B* Los tiempos de fraguado se refieren al tiempo de fraguado inicial de la NTP 334.006.
- C* Un valor obtenido de contenido de aire en el mortero, no necesariamente asegura que un contenido de aire deseado se obtendrá en el concreto.
- D* Los cementos pueden ser embarcados antes que datos de ensayos de edad posteriores estén disponibles. En tales casos el valor de ensayo puede ser dejado en blanco. Alternativamente, el fabricante puede generalmente proporcionar estimaciones basadas en datos de producción histórica. El informe indicará si tales estimaciones son proporcionadas.
- E* Cuando el cemento HS cumpla con los límites a los 06 meses no será requerido el ensayo a un año. Un cemento HS que no cumpla el límite de 06 meses no será rechazado a menos que también incumpla el límite de 01 año.
- F* La sujeción a este requisito no debe solicitarse, a no ser que el cemento sea utilizado con agregados álcali reactivos.
- G* A solicitud del comprador, datos de la contracción por secado deben ser proporcionados.

b) Expansión por sulfatos según Norma Técnica Peruana NTP 334.009

TABLA 4 - Requisitos físicos opcionales^A

REQUISITOS	MÉTODO DE ENSAYO NTP	TIPO DE CEMENTO				
		I II	II(MII)	III	IV	V
Falso fraguado, penetración final, mín., %	334.065	50	50	50	50	50
Calor de hidratación	334.064	-	290 ^B	-	250 ^B	-
7 días, máx, kJ/kg		-	-	-	290 ^B	-
28 días, máx, kJ/kg	334.171	-	255 ^C	-	200 ^B	-
Calor de hidratación ^B		-	-	-	225 ^B	-
3 días, máx, kJ/kg		-	-	-	-	-
7 días, máx, kJ/kg	334.051	28,0	28,0	-	-	-
Resistencia a la compresión, 28 días, MPa		-	22,0 ^E	-	-	-
Resistencia a sulfatos ^F , 14 días máx, % de expansión	334.065	-	-	-	-	0,040
Ensayo de Gillmore:	334.056	-	-	-	-	-
Fraguado inicial, minutos, no menor que:		60	60	60	60	60
Fraguado final, minutos, no mayor que:	334.072	600	600	600	600	600
Prueba de turbidímetro		-	-	-	-	-
... mín	150	150	---	150	150	
... máx	---	245 ^G	---	245	---	

NOTAS:

^A Estos requisitos opcionales se aplican solamente cuando son expresamente solicitados. Se debe verificar la disponibilidad antes de ordenar el pedido del cemento. Véase Nota 2.

^B El método utilizado debe ser especificado en los reportes que incluyan este dato. Si los resultados de

c) Cambios de longitud en morteros expuestos a soluciones sulfatadas NTP 334.094

NORMA TÉCNICA PERUANA	NTP 334.094 2017
Dirección de Normalización - INACAL Calle Las Camelias 817, San Isidro (Lima 27)	
Lima, Perú	

CEMENTOS. Método para determinar el cambio de longitud en morteros de cemento Portland expuestos a soluciones sulfatadas

CEMENT. Test Method for determining length change of portland-cement mortars exposed to a sulfate solution

2017-12-27
3ª Edición

R.D. N° 057-2017-INACAL/DN. Publicada el 2018-01-03 Precio basado en 23 páginas
I.C.S.: 91.100.10 ESTA NORMA ES RECOMENDABLE
Descriptores: Cemento, método normalizado, cambio de longitud, mortero, cemento Portland, solución sulfatada

NORMA TÉCNICA PERUANA	NTP 334.094 5 de 23
--------------------------	------------------------

3 Significado y uso

La solución estándar expuesta usada en este método de ensayo, mientras no exista otra directiva, contiene 352 moles de Na_2SO_4 por m^3 (50 g/L). Otras concentraciones de sulfatos u otros sulfatos como MgSO_4 pueden utilizarse para simular la exposición al medio ambiente de interés. En el Anexo A se presenta una mayor información de éste y otros aspectos técnicos de interés.

4 Aparatos

4.1 Mezclador, conforme al requerimiento de la NTP 334.003.

4.2 Moldes cúbicos, conforme a los requerimientos del método de ensayo de la NTP 334.051.

4.3 Moldes para barra, conforme a los requerimientos de la NTP 334.076.

4.4 Comparador, conforme con lo requerido en la NTP 334.076

4.5 Contenedores: Los contenedores en los cuales se sumergen las barras deben ser resistentes a la corrosión como el plástico, vidrio o cerámica. Se incluirán dispositivos para soportar las barras de tal modo que ni el fondo ni los lados de la barra descansen contra el contenedor; deberán tener una tapa que selle el recipiente de tal modo que la solución no pueda evaporarse.

4.6 Contenedor inicial de curado: el recipiente y los soportes ajustables en los que se van a curar las muestras deben ser resistentes a la corrosión y al calor, como plástico, vidrio o cerámica. El contenedor deberá tener un tamaño que permita el almacenamiento de las muestras, de modo que ningún extremo o lado de una barra o cubo se apoye contra el recipiente. La tapa del recipiente debe ser hermética, de modo que el agua no pueda evaporarse. Puede requerirse más de un recipiente para el curado inicial de un conjunto completo de barras y muestras de cubos.

4.7 Homos: Un horno de convección con control de temperatura mantenida $35 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$.

5 Reactivos y materiales

5.1 **Pureza de los reactivos:** Se pueden utilizar reactivos químicamente puros o, de grado técnico, siempre que se demuestre que éste sea de alta pureza, lo suficiente como para permitir su uso sin pérdida de precisión en la evaluación. Cuando los ensayos son realizados para determinar la aceptación o rechazo, se recomienda utilizar el reactivo químicamente puro, de conformidad con las especificaciones del comité de reactivos analíticos de la *American Chemical Society*, donde dichas especificaciones están disponibles.

5.2 **Pureza del agua:** Salvo otras indicaciones, las referencias del agua deben ser entendidas como para producir un agua de grado reactivo mediana conforme al Tipo IV de las especificaciones ASTM D 1193.

5.3 **Sulfato de sodio (Na_2SO_4):** El contenido en el agua será comprobado mediante el ensayo de pérdida por calcinación, cada vez que se prepara la solución. Se puede utilizar cualquier solución de sulfato de sodio hidratado o anhidro, si el contenido de agua en la sal puede comprobarse por pérdida por calcinación y efectuarse las correcciones apropiadas para responder a la concentración especificada de sulfato.

5.4 **Solución sulfatada:** Cada litro de solución debe contener 50,0 g de Na_2SO_4 disueltos en 900 mL de agua y debe ser diluida con adición de agua destilada o desionizada para obtener 1,0 L de solución. Mezclar la solución un día antes de utilizarla, cubrirla y almacenarla a $23,0 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Determinar el pH de la solución antes de ser utilizada; rechazar la solución si el pH está fuera del rango de 6,0 a 8,0. Mantener la proporción en volumen de la solución del sulfato a la barra del mortero en el contenedor de $4,0 \pm 0,5$ volúmenes de solución a un volumen de la barra. Para barras de mortero de 25,4 mm x 25,4 mm x 285,75 mm (volumen de 184 mL) esto es 645 a 830 mL de solución por barra de mortero en el contenedor de almacenaje. Para barras de mortero de 25 mm x 25 mm x 285 mm (Volumen de 178 mL), esto es 625 mL a 800 mL de solución por barra de mortero en el recipiente de almacenamiento.

© INACAL 2017 - Todos los derechos son reservados

5.5 Materiales

5.5.1 Arena gradada normalizada, de conformidad con la especificación de la NTP 334.097.

5.5.2 Anclajes (Pines) de acero inoxidable, de conformidad con la especificación de la NTP 334.076.

6 Peligros

Advertencia: Las mezclas frescas del cemento Portland son cáusticas y pueden causar quemaduras químicas en los ojos y la piel sobre exposiciones prolongadas.

7 Preparación del mortero

7.1 Preparar morteros como se describe en la NTP 334.051, o sea una parte de cemento y 2,75 partes de arena por masa. Usar una relación agua-cemento por peso de 0,485 para todos los cementos Portland sin aire incorporado y 0,46 para todos los cementos Portland con aire incorporado. Usar una relación agua-cemento de 0,485 para cementos NTP 334.090 o NTP 334.082. Para adiciones de cementos Portland con puzolanas o escorias, usar una relación agua-cemento que produzca un flujo dentro de $\pm 5 \%$ la del mortero de cemento Portland a una relación agua-cemento 0,485.

8 Moldes de especímenes y contenedores de curado inicial

8.1 Preparar los moldes de los especímenes de acuerdo con lo especificado en la NTP 334.076 excepto que el interior de la superficie del molde debe ser cubierto con un agente liberador. Un agente liberador se puede considerar como aceptable, si no afecta el fraguado del cemento y sin dejar residuos que inhiban la penetración del agua al interior del espécimen.

© INACAL 2017 - Todos los derechos son reservados

NOTA 1: La cinta TFE - fluorocarburo cumple con los requisitos para los agentes liberadores de moldes.

8.2 Preparación del contenedor de curado

8.2.1 Antes de moldear la muestra de ensayo, prepare el recipiente de curado inicial colocando los soportes ajustables en el fondo del recipiente para elevar los moldes por encima del nivel de agua desecada. Llenar el recipiente con agua precalentada a $35 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, asegurándose de que el agua no exceda la parte superior de los soportes ajustables.

9 Procedimiento

9.1 **Moldeado y curado inicial de especímenes:** Moldear las barras de ensayo de acuerdo con la NTP 334.165. Moldear los cubos de conformidad con la NTP 334.051, el número de especímenes a ensayar por cada cemento (consistirá en 6 barras y por lo menos 21 cubos (Nota 2). Inmediatamente después del moldeado cubrir los moldes con una lámina rígida de acero, vidrio o plástico, sellar la tapa al molde para impermeabilizar y colocar el molde en el tanque de curado sobre la parte superior. Cubrir el contenedor con una tapa y selle la tapa para evitar la evaporación y coloque el recipiente en un horno a $35 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ durante $23 \frac{1}{2} \text{ h} \pm 30 \text{ min}$. A las $23 \frac{1}{2} \text{ h} \pm 30 \text{ min}$, sacar los moldes del tanque y desmoldar los especímenes.

NOTA 2: El número de cubos a ser ensayados consistirá en 21 cuando no se dispone de información histórica acerca de la velocidad de desarrollo de la resistencia. Cuando se dispone de esta información (como por ejemplo del uso de los procedimientos según la NTP 334.101, justificaría fabricar menos cubos, solamente para confirmar el tiempo en que el mortero alcanza $20,0 \text{ MPa} \pm 1,0 \text{ MPa}$ ($3000 \text{ psi} \pm 150 \text{ psi}$).

© INACAL 2017 - Todos los derechos son reservados

9.2 **Curado posterior y preparación para el ensayo:** Después del desmolde, almacenar todas las barras y cubos, excepto los 2 cubos que van a ser ensayados en compresión, en el tanque de curado con agua saturada de cal a $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, después del desmolde. Ensayar los dos cubos de acuerdo con la NTP 334.051, después del desmolde cuando los especímenes se han enfriado a la temperatura ambiente con paños húmedos. Si el promedio de resistencias de los cubos es 20 MPa o más, medir y registrar las lecturas del comparador de acuerdo con la NTP 334.076 tal como se describe en el capítulo de medida del cambio de longitud y colocar todas las barras en la solución sulfatada. Si no se alcanza los 20 MPa , almacenar los cubos desmoldados y las barras en el tanque de curado y ensayar cubos adicionales (véase Nota 3). Realizar un pronóstico basado en los ensayos de los dos primeros cubos, sobre cuándo podría alcanzarse los 20 MPa . Verificar la predicción, observar y registrar las lecturas del comparador y colocar todas las barras en la solución sulfatada (Véase la Nota 3). Estas medidas constituyen las lecturas iniciales de longitud. La temperatura de almacenamiento y ensayo debe ser $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

NOTA 3: Si el valor de la resistencia a las 24 horas es menor de 20 MPa y en el caso que no sea posible realizar ensayos adicionales el mismo día, y que probablemente se pueda alcanzar 21 MPa al día siguiente, ya no sería necesario rehacer la tanda. Si los dos cubos no alcanzan la resistencia requerida, continuar curando los cubos y las barras como se menciona en 9.2 en un tanque de curado de agua de cal saturada a $23,0 \pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

9.3 **Almacenamiento de las barras de ensayo durante la exposición en la solución de ensayo:** Cubrir el recipiente de las barras y la solución de ensayo, sellarlo a fin de prevenir la evaporación del interior, o dilución con agua del exterior (Véase la Nota 4). Las temperaturas de almacenaje y ensayo debe ser $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (Véase Nota 5).

NOTA 4: Una cinta adhesiva o cinta aislante ha sido considerada como idónea para el sellado del recipiente.

NOTA 5: Ésta es la mínima temperatura y rango de temperaturas que se indican para gabinetes de humedad de la especificación NTP 334.077.

9.4 **Mediciones de cambios de longitud:** A 1, 2, 3, 4, 8, 13 y 15 semanas después que las barras son colocadas en la solución sulfatada; medir los cambios de longitud utilizando el comparador de longitudes de acuerdo con la NTP 334.076. A las 15 semanas revisar los datos. Hacer las siguientes mediciones a 4, 6, 9 y 12 meses. Si en cualquier momento la relación de cambio entre lecturas es grande, insertar otras lecturas como sean necesarias para asegurar que los intervalos sean cortos a fin de permitir observar y reportar el comportamiento de las barras. Si se cumple la exposición requerida en el ACI C201-2R-01 Clase 3, se medirán las barras a los 4, 6, 9, 12, 15 y 18 meses (Nota 6).

© INACAL 2017 - Todos los derechos son reservados

NOTA 6: El ACI C201-2R-01 requiere un límite de 18 meses para exposición Clase 3.

9.4.1 Detalles de medición de barras para cambios de longitud:

9.4.1.1 Limpiar el agujero de la base del comparador en el cual se fija el pin inferior (este agujero tiende a coleccionar agua y arena y debe ser limpiado después de cada lectura). Leer y registrar la indicación de la longitud de la barra del comparador. Sacar una barra de la inmersión, secar los pines, poner la barra en el comparador, leer y registrar las lecturas del comparador. Retornar la barra a la solución y limpiar el agujero en la base del comparador. Sacar una segunda barra y tratarla de la misma manera. Retornar la segunda barra a la inmersión, registrar la lectura y limpiar el agujero de la base del comparador. Continuar el procedimiento hasta que todas las barras hayan sido leídas, registradas las lecturas y retornadas a la solución, limpiando el agujero de la base del comparador en cada momento. Después de la lectura de la última barra limpiar nuevamente el agujero de la base del comparador. Leer y registrar la indicación de la barra de referencia.

9.4.1.2 Cuando la resistencia requerida del mortero es alcanzada de acuerdo con 9.2, almacenar las barras en la solución sulfatada fresca. Para siguientes lecturas de cambios de longitud, proceder como se describe en 9.4.1.1; limpiando el soporte en la base del comparador antes de la lectura de la barra de referencia inicialmente y después de la lectura de cada barra de mortero. Registrar las lecturas de la barra de referencia y la barra de mortero. Leer y registrar la barra de referencia nuevamente después de medir la última barra. Secar sólo alrededor de los anclajes (Pines) (Nota 7). Retornar cada barra a la solución de sulfato usada después de la lectura. Desechar la solución usada, cuando todas las barras han sido medidas a intervalos estándar: 1, 2, 3, 4, 8, 13 y 15 semanas y 4, 6, 9, 12, 15 y 18 meses. Enjuague el recipiente una sola vez con agua, eliminando el agua con los desechos. Reemplazar el marco de colocación de las barras en el contenedor, llenar el contenedor suficientemente con la nueva solución para sumergir las barras y asegurar la tapa sobre el mismo.

NOTA 7: El propósito de secado mínimo de los anclajes (Pines) y no de las barras es evitar el secado y oxidación de las barras. Se ha observado que cuando las barras son secadas ligeramente con un paño seco estas tienden a contraerse de forma medible. Por lo que el secado deberá ser minimizado.

© INACAL 2017 - Todos los derechos son reservados

9.4.2 **Control de especímenes después de las mediciones de cambios de longitud:** Cuando las barras parezcan tener un comportamiento inusual o cuando el ensayo es parte de una investigación, se determinará además el alabeo de las barras colocándolas sobre una superficie plana de tal manera que la concavidad quede hacia abajo, deberá medirse esta concavidad. Anotar las fracturas (presencia, ubicación, tipo); depósitos superficiales; moteados; exudaciones (naturaleza, espesor, tipo).

9.5 **Tolerancia en el tiempo:** Todas las referencias al tiempo transcurrido indicadas en 9.4 se darán con una tolerancia de $\pm 2\%$.

10 Cálculo

10.1 Calcular el cambio de longitud a cualquier edad, como sigue:

$$\Delta L = \frac{L_x - L_r}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

- ΔL : Cambio de longitud a la edad x, %
- L_x : Lectura en el comparador del espécimen a la edad x - lectura de la referencia a la edad x.
- L_r : Lectura inicial del espécimen - lectura de la barra de referencia, al mismo tiempo.
- L_0 : Longitud nominal del calibre, o 250 mm como sea pertinente (Véase la NTP 334.076).

10.2 Calcular los valores de cambio de longitud para cada barra con aproximación al 0,001 % y el reporte de los promedios al 0,01 %.

© INACAL 2017 - Todos los derechos son reservados

11 Reporte

11.1 Reportar el tipo de cemento y cuando se usa materiales de adición, su identificación y cantidad, y si el cemento y el material de mezcla, si se usan, cumplen con las especificaciones aplicables. Reportar la lectura inicial de cada barra al tiempo de la inmersión en la solución sulfatada; éste es el valor base para calcular el cambio de longitud. Reportar los cambios de longitud posteriores como porcentaje del valor base, con aproximación al 0,001 % para las barras individuales y al 0,01 % para los promedios. Comentar sobre la condición visual de las barras al final de los ensayos. Con cada reporte del promedio de los cambios de longitud de las barras a una edad particular, reportar el número de barras (n), la desviación normal y coeficiente de variación del cambio de longitud. Se debe disponer de por lo menos tres barras por cada edad a fin de constituir un ensayo válido a esa edad. Dependiendo de la cantidad de especímenes restantes, el rango máximo permisible de los valores en el cambio de longitud no debe exceder los valores del cambio de longitud indicados en la Tabla 1.

TABLA 1 - Máximo Rango de Valores Permisibles

Numero de especímenes restantes	Cementos adicionados	Cementos Pórtland
3	0,034	0,010
4	0,037	0,011
5	0,039	0,012
6	0,041	0,012

11.2 Reportar los cambios en el procedimiento reseñado en esta NTP, como por ejemplo la composición de la solución, concentración o temperatura, proporciones del mortero, edad o madurez, que hayan sido convenientes.

12 Precisiones y desviación

12.1 La precisión de este método de ensayo ha sido evaluada por ensayos interlaboratorios y establecida para variar con el tipo de cemento estudiado hasta que se determine la precisión por separado.

© INACAL 2017 - Todos los derechos son reservados

12.1.1 Cementos adicionados: Para un mismo operador la desviación normal ha sido establecida en 0,010 % para expansiones entre 0,04 % y 0,07 %. Luego, los resultados de dos ensayos realizados por un mismo operador, con un mismo cemento adicionado Tipo IP o IS, no deberían diferir en más de 0,028 %. Para varios laboratorios, la desviación normal ha sido establecida en 0,020 % para expansiones entre 0,04 % y 0,07 %. Luego, los resultados de dos ensayos realizados con un mismo cemento adicionado Tipo IP o IS por dos diferentes laboratorios no diferirán en más de 0,056 %.

12.1.2 Cementos Tipo II: Para un mismo operador la desviación normal ha sido establecida en 0,005 % para expansiones entre 0,04 % y 0,07 %. Luego, los resultados de dos ensayos realizados por un mismo operador, con un mismo cemento, no diferirán en más de 0,014 %. Para varios laboratorios la desviación normal ha sido establecida en 0,020 % para expansiones entre 0,04 % y 0,07 %. Luego, los resultados de dos ensayos realizados con un mismo cemento en dos diferentes laboratorios no diferirán en más de 0,056 %.

12.1.3 Cemento Tipo V: Para un mismo operador la desviación normal ha sido establecida en 0,003 % para expansiones en 0,04 % y 0,07 %. Luego los resultados de dos ensayos realizados por un mismo operador, con un mismo cemento, no diferirán en más de 0,009 %. Para varios laboratorios la desviación normal ha sido establecida en 0,010 % para expansiones entre 0,04 % y 0,07 %. Luego, los resultados de dos ensayos realizados con un mismo cemento en dos diferentes laboratorios no diferirán en más de 0,028 %.

12.2 Sesgo: Mientras no sea aceptado un material de referencia adecuado para la determinación de la desviación para los procedimientos en este método de ensayo, la desviación no será establecida.

13 Bibliografía

ASTM C1012 / C1012M - 15 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution

© INACAL 2017 - Todos los derechos son reservados